

Université de Montréal

L'influence de la stratégie de navigation dans un environnement virtuel sur l'activité cérébrale
en EEG

par Hugo Laflamme

Département de Psychologie, Faculté des Arts et des Sciences

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de M.Sc en Psychologie
sous la direction de Gregory L. West

31 Août 2018
© Hugo Laflamme, 2018

Sommaire

L'importance de nos capacités à nous orienter ou nous diriger est illustrée par nos capacités à retrouver notre chemin lorsque nous sommes perdus. Lorsqu'il doit s'orienter, l'être humain utilise spontanément des stratégies de navigation lui permettant de se rendre efficacement à destination. Chaque individu utilise instinctivement une stratégie soit allocentrique, soit egocentrique, selon la prédominance du volume de son hippocampe ou de celui de ses noyaux caudés. Bien que les stratégies allocentriques soient associées à un volume hippocampique plus important, les stratégies égocentriques tendent à être liées à son hypotrophie. Il existe des liens importants entre la stratégie adoptée et le volume hippocampique. Une activité et un volume important de matière grise dans l'hippocampe sont reliés à des stratégies de navigation allocentriques, alors qu'une faible activité et un faible volume sont reliés à l'utilisation de stratégies egocentriques (West et al., 2015; Iaria, Petrides, Dagher, Pike et Bohbot, 2003; Bohbot, Lerch, Thorndyrcraft, Iaria & Zijdenbos, 2007; Lerch et al., 2011; Etchamendy, Konishi, Pike, Marighetto, Bohbot, 2012; Konishi et al., 2013).

Le but de ce mémoire est de démontrer que l'entraînement à des jeux vidéo de type « plateforme » permet de stimuler l'activité de l'hippocampe. À l'aide d'un électroencéphalogramme, cette étude cherche à observer l'activité fréquentielle des ondes thêta (4-8Hz), qui est reliée au fonctionnement hippocampique, mais également celle des ondes gamma (30-50Hz). Selon les hypothèses établies dans cette étude, il

devrait y avoir une augmentation significative d'activité thêta (qui découle de l'activité hippocampique) sur les deux groupes expérimentaux, celle-ci devrait s'avérer significativement plus importante chez les participants utilisant instinctivement une stratégie allocentrique.

Après avoir déterminé quelle stratégie est utilisée par chacun des 39 jeunes adultes neurotypiques qui ont été testés, leur activité cérébrale a été mesurée à l'aide d'un EEG pendant qu'ils jouaient à « Super Mario 64 » en périodes de quinze minutes entrecoupées de phases d'état de repos (Resting State). Nos résultats illustrent que les utilisateurs de stratégies allocentriques montrent une augmentation significative de l'activité thêta lors de niveaux actifs (incluant des objectifs faisant appel à la navigation) par rapport au niveau contrôle (mouvements répétitifs seulement, sans objectif de navigation clair) dans toutes les régions analysées (frontale, centrale, pariétale et occipitale). Les participants utilisant une stratégie egocentrique présentent également une augmentation significative de l'activité thêta dans les niveaux actifs par rapport au niveau contrôle, mais uniquement dans la région frontale. Ces résultats confirment que l'EEG peut être utilisé pour mettre en évidence l'activité cérébrale émise durant la navigation spatiale.

Mots clés : Neuropsychologie, Navigation Spatiale, Stratégies de Navigation Spatiale, EEG, Électroencéphalogramme, Jeux Vidéos, Hippocampe, Noyaux Caudés, Activité Hippocampique, Ondes Cérébrales, Ondes Thêta, Ondes Gamma.

Summary

The importance of our ability to orient ourselves or navigate in a given environment is pictured by our ability to find our way back when we are lost. As it must orientate itself in a given environment, the human being spontaneously uses navigational strategies to successfully arrive to its destination. Every individual instinctively uses a strategy that's either allocentric or egocentric, depending upon which structure among the hippocampus or the caudate nucleus has the most predominant volume. As the allocentric strategies tend to be associated to a more important hippocampic volume, the egocentric strategies tend to be linked to a lesser one. There are important connections between the used strategy and one's hippocampic volume. An important hippocampic grey matter volume and activity are associated to allocentric navigational strategies, as a lower volume and activity are associated to the use of egocentric strategies (West & al., 2015; Iaria, Petrides, Dagher, Pike & Bohbot, 2003; Bohbot, Lerch, Thorndyrcraft, Iaria & Zijdenbos, 2007; Lerch & al., 2011; Etchamendy, Konishi, Pike, Marighetto & Bohbot, 2012; Konishi & al., 2013).

The goal of this master's thesis is to demonstrate that platform video game training allows to stimulate hippocampic activity. Using an electroencephalogram, we have been monitoring the theta waveband frequential activity (4-8Hz), as we know it to be linked to hippocampic activity, but also, gamma wavebands (30-50Hz). As we estimate that there should be a significant augmentation of theta activity (which is influenced by

hippocampic activity) on both experimental groups, it should be more important among the participants using instinctively an allocentric strategy.

After determining which strategy is used by each of the 39 neurotypical young adult we have tested, we have measured their cerebral activity with an EEG while they were playing “Super Mario 64” in 15-minute periods separated by resting state phases.

Our results show that the allocentric users have a theta activity augmentation when tested on active levels (which include navigation soliciting objectives) compared to the control level (repetitive movement, without definite navigation objectives) in all analyzed scalp region (frontal, central, parietal, occipital). Participants using an egocentric also show a significant augmentation of theta activity in the active levels compared to the passive ones but only in the frontal region. These results demonstrate that EEG can be used to highlight the different cerebral activities issued during spatial navigation and bring out the interest of this technique.

Keywords: Neuropsychology, Spatial Navigation, Spatial Navigation Strategies, EEG, Electroencephalogram, Video Games, Hippocampus, Caudate Nucleus, Hippocampus Activity, Cerebral Wavebands, Theta Wavebands, Gamma Wavebands.

Table des matières

Sommaire	ii
Summary.....	iv
Table des matières	vi
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Liste des abréviations	x
Remerciements.....	xi
1.Introduction.....	2
1.1 Position du problème	2
2. Contexte Théorique	3
2.1 Les stratégies allocentriques et egocentriques.....	3
2.2 Les liens entre stratégies de navigation et l'hippocampe.....	4
2.3 La carte cognitive de Berthoz.....	5
2.4 Les stratégies spatiales et réponses.....	7
2.5 Le labyrinthe virtuel 4 sur 8	8
2.6 L'activité des ondes thêta mesurée par analyse fréquentielle	9
2.6.1 Les ondes thêta et la navigation.....	9
2.6.2 Les ondes thêta et le labyrinthe 4 sur 8	11
2.7 Le lien entre les jeux vidéo et les stratégies de navigation.....	12
2.7.1 Types de jeux vidéo et volume des structures cérébrales	12
2.7.2 Différences entre joueurs et non-joueurs	14
3. Hypothèses	15
4. Matériel et Méthodes.....	16
4.1 Participants	16
4.2 Tâches expérimentales	17
4.2.1 Labyrinthe 4 sur 8 (4 on 8)	18

4.2.1.1	Composition du 4 sur 8	18
4.2.1.2	Phases d'apprentissage et de test	19
4.2.1.3	Les types d'erreur	20
4.2.1.4	L'essai sonde	22
4.2.1.5	La cotation de l'essai sonde	23
4.2.1.6	Le déroulement du labyrinthe 4 sur 8	24
4.2.2	Labyrinthe Paires Recombinées (Pairs Recombined)	26
4.2.3	Navigation dans une ville virtuelle (Wayfinding)	30
4.2.4	Entraînement aux contrôles – Super Mario 64	32
4.2.5	Test d'orientation spatial – Super Mario 64	33
5.	Déroulement de la recherche	36
5.1	Enregistrement par Électroencéphalogramme et Traitement	37
5.2	Traitement statistique	38
5.2.1	Entrevue 4 sur 8	38
5.2.2	Nettoyage de données	39
5.2.3	Test statistiques utilisés	39
6.	Résultats	40
6.1	ANOVA à mesures répétées	40
6.2	Test-t appariés intragroupes (3L)	42
6.2.1	Ondes Thêta	42
6.2.2	Ondes Gamma	44
6.3	Test-t indépendants et appariés (niveaux B-D-F)	44
7.	Discussion	46
7.1	Recommandations futures	52
7.2	Perspectives	54
8.	Références	55
9.	Annexes	xii

Listes des tableaux

Tableau 1	Démographie des participants	17
Tableau 2	Format des cartes du labyrinthe 4 sur 8	20

Liste des figures

Figure 1	Ordre standard des tests administrés.....	18
Figure 2	Les différents modèles de cartes du labyrinthe 4 sur 8.....	21
Figure 3	Décalage des chemins lors de l'essai son du labyrinthe paires recombinées.....	29
Figure 4	Capture d'écran de la ville virtuelle	31
Figure 5	Déroulement du test d'orientation spatial – Super Mario 64	35
Figure 6	Les différences d'activité cérébrale thêta entre les niveaux actifs (3L) et le niveau contrôle (H)	42
Figure 7	Les différences d'activité cérébrale thêta entre les niveaux actifs (3L) et le niveau contrôle (H) - Intragroupe	43

Liste des abréviations

aVPG – Action Video Game Players / Joueurs de jeux vidéo d'action

EEG - Électroencéphalogramme

Hz – Unité mesure en Hertz

iEEG – Électroencéphalogramme intracrânien

nonVGP – Non-Video Game Players / Non-joueurs de jeux vidéo

RM – Erreur de type « Reference Memory »

TEP – Tomographie par émission de positrons

uV – Unité mesurée en microvolts

VBM – Morphométrie fondée sur le Voxel / Voxel Based Morphometry

VGP – Video game players / Joueurs de jeux vidéo

WMc – Erreur de type « Working Memory Correct »

WMi – Erreur de type « Working Memory Incorrect »

Remerciements

Je veux tout d'abord remercier mon directeur, Gregory L. West, pour le soutien dont il a fait part tout au long de mon parcours académique, tant au baccalauréat qu'à la maîtrise.

Je veux ensuite remercier Simon Rigoulot, ainsi que de le féliciter pour l'obtention de son poste de professeur agrégé à l'Université du Québec à Trois-Rivières. Je tiens également à souligner son implication dans mon projet tout au long de ma maîtrise, spécialement concernant la revue de mon mémoire durant les derniers mois.

Je souhaite également remercier mes collègues Caroll-Ann Blanchette, Étienne Aumont, Sophie McCullin ainsi que mes nouveaux collègues du BRAMS pour leur support, tout autant au niveau académique que moral, parce que dieu seul sait à quel point j'en ai eu besoin.

Pour conclure, j'aimerais remercier du fond du cœur mes amis qui m'ont encouragé (et dont la liste exhaustive rallongerait sans doute un peu trop la section), ma famille; spécialement mes cousines Elyse et Marie-Hélène, mes cousins Nicolas, Philippe, et Julien, qui m'ont conseillé, encouragé et ont tous connu les joies et les peines des études supérieures, ainsi que mes parents : Line et Gilles pour leur amour et leur soutien, toujours et à jamais inconditionnel.

1. Introduction

1.1 Position du problème

Durant son quotidien, l'être humain utilise fréquemment la navigation spatiale. Que ce soit pour se rendre au travail, à la maison ou lors d'activités quotidiennes, il est nécessaire d'avoir recours à diverses stratégies pour arriver à s'orienter de façon efficace. Ces stratégies se nomment « allocentrique » (également appelée « spatiale ») et « egocentrique » (également appelée « réponse »). Il existe des liens spécifiques entre chacune de ces stratégies de navigation et différentes structures cérébrales. Par exemple, l'utilisation de stratégies allocentriques témoigne généralement d'un volume hippocampique important, alors que l'utilisation de stratégies egocentrique est signe d'une prépondérance du volume du striatum, plus précisément des noyaux caudés. Certains types de jeu tendent à influencer le développement de ces structures cérébrales. Par exemple, les jeux d'action et de tir à la première personne tendent à encourager une augmentation de la taille des noyaux caudés (West et al., 2017), alors que les jeux vidéo de type plateforme tendent plutôt à causer une augmentation du volume hippocampique (Kühn, Gleich, Lorenz, Linderberger et Gallinat, 2014). Il est connu que le volume hippocampique et le volume du striatum tendent à entretenir une relation inversement proportionnelle (West et al., 2015; Iaria, Petrides, Dagher, Pike et Bohbot, 2003; Bohbot, Iaria et Petrides, 2014). Or, certaines études démontrent que la prédominance de stratégies égocentriques tend à augmenter avec l'âge (Moffat et Resnick, 2002; Rodgers, Sindone et Moffat, 2012; Bohbot et al., 2012). Il est connu que l'hippocampe est fortement atrophié dans la maladie d'Alzheimer. Puisque le volume

hippocampique est lié à la stratégie utilisée, Il incombe de développer des manières de stimuler l'utilisation de stratégie allocentriques chez des personnes utilisant typiquement une stratégie egocentrique (Bohbot, 2015; Sodums, 2016). Du fait de ces liens, cette étude vérifiera les variations d'ondes cérébrales thêta chez des participants utilisant chacun des types de stratégie de navigation pendant qu'ils jouent à un jeu de type plateforme. Cet ouvrage permettra ainsi de clarifier les liens probables entre les différentes stratégies de navigation dans un environnement virtuel et le fonctionnement cérébral chez les non-joueurs de jeux vidéo lors de l'utilisation d'un électroencéphalogramme.

2. Contexte Théorique

2.1 Les stratégies allocentriques et egocentriques

Deux types de stratégies de navigations ont été catalogués jusqu'à présent : le premier type regroupe les stratégies allocentriques (ou spatiales) faisant appel à l'hippocampe. L'utilisation de stratégies spatiales implique d'établir des relations entre divers éléments présents dans l'environnement (ex : décor, points de repère) pour s'orienter. Le second type, comprenant les stratégies égocentriques, dépend quant à lui du striatum, plus précisément des noyaux caudés. Celles-ci se décrivent principalement par une préprogrammation motrice des mouvements à effectuer pour se rendre à destination (ex : tourner à la première rue à gauche, puis à la seconde à droite) et repose sur

l'établissement de liens par l'utilisateur entre lui-même et des points de repère présents dans l'environnement.

2.2 Les liens entre stratégies de navigation et l'hippocampe

Dès les années 1960, plusieurs chercheurs ont mis en évidence des liens entre l'hippocampe et l'activité corticale dans des procédures expérimentales impliquant la navigation spatiale (Green, Maxwell & Petsche 1961, Green & al. 1960, Green & Petsche 1961), par exemple, O'Keede et Nadel ont décrit en 1978 une association stimulus-stimulus entre des points de repère et l'environnement par un sujet. Ils définissent cette stratégie comme étant allocentrique. Ils découvrent également l'existence d'une stratégie impliquant l'apprentissage d'une série réponses motrices (ex : tourner à gauche, puis à droite) à partir de points de repère spécifiques qui agiront comme stimuli. Ils définissent cette stratégie comme étant egocentrique. White et McDonald (2002) définissent par la suite cette stratégie comme étant une association stimulus-réponse. D'autres études ont également découvert l'importance des structures temporales médianes bilatérales (Goldstein, Canavan & Polkey, 1989) dans la navigation spatiale. D'autres chercheurs ont par la suite tenté de démarquer si la latéralisation des lésions temporales avait une influence ou si les deux côtés doivent être affectés afin de pouvoir observer des déficits de l'orientation spatiale chez un sujet. Des tests ont été effectués dans le cas de lésions temporales unilatérales spécifiques, c'est-à-dire, une étude où les participants avaient tous une lésion temporale du côté droit seulement

(Feigenbaum, Polkey, & Morris, 1996). Cette étude, mettant l'emphasis sur l'importance de la région temporelle droite, a été appuyée par Morris, Pickering, Abrahams & Feignebaum (1996) ainsi que l'étude successive d'Abraham, Pickering, Polkey & Morris (1997). Il existe néanmoins des études dans lesquelles les lésions temporelles unilatérales étaient divisées entre deux groupes expérimentaux : des participants lésés du côté droit seulement et des participants lésés du côté gauche exclusivement (à noter que ces groupes ont été comparés entre eux, mais également à des participants d'un groupe contrôle neurotypique) (Maguire, Burke, Phillips & Stauton, 1996). Holdstock et ses collègues (2000) ont également démontré qu'une lésion au niveau de l'hippocampe affectait l'utilisation d'une stratégie allocentrique, plus précisément au niveau de la mémoire à long terme dans une étude de cas sur une patiente, YR. Il semblait également que la lésion hippocampique affectait peu, sinon aucunement l'utilisation de stratégies égocentriques.

2.3 La carte cognitive de Berthoz

Berthoz (2001) a suggéré, suite à l'établissement de « routes » formant la carte cognitive (incluant par ailleurs des structures pariéto-frontales), que ces stratégies d'orientation pourraient être des entités cognitives en soi, appelée la mémoire topokinétique ou topokinesthésique. Cette mémoire est composée d'un ensemble complexe de structures impliquant le cortex pariétal, le cortex pariéto-insulaire, l'insula, le cortex cingulaire, la formation hippocampique et le cortex frontal dorsolatéral. Il s'agit

d'une mémoire cognitivo-motrice construite pendant la navigation et qui met en relation le corps et l'environnement sous la forme d'un script rétroactif (Berthoz, 2001). Ils réfèrent d'ailleurs à une étude antérieure dans laquelle des participants sains devaient effectuer une tâche de détection du plan sagittal du corps alors qu'ils étaient en train de passer une IRM (Vallar et al., 1999). Un point était affiché sur un écran et était animé d'une lente animation horizontale. Le participant devait appuyer sur un bouton lorsque le point atteignait les deux extrémités de sa course et lorsque le point était droit devant eux (ce que les auteurs décrivent comme étant « l'intersection du plan sagittal de leur corps et de l'écran le plan sagittal du corps »). En effectuant une soustraction des aires activées lorsque le point atteignait les deux extrêmes par celles activées lorsque le point était droit devant, ils ont découvert que les aires activées durant la tâche égocentrée incluait le gyrus occipital supérieur, le sillon précentral gauche, le sillon intrapariétal, le gyrus angulaire et le gyrus frontal inférieur droit. La tâche allocentrée fait quant à elle rapport d'une activation du gyrus lingual ainsi que d'une portion uniquement à droite du réseau egocentrique mentionné précédemment. Ces résultats sont démontrés par une activation asymétrique prévalente sur le côté droit du cerveau. Cela est consistant les résultats présents dans la littérature sur l'héminégligence et les lésions cérébrales unilatérales stipulant que les déficits au niveau de la navigation égocentrique sont plus sévères chez des sujets présentant une lésion du côté droit, alors que ceux ayant une lésion du côté gauche uniquement font généralement des erreurs mineures (Vallar et al., 1999). Les auteurs mentionnent également que c'est le système vestibulaire couplé à la vision qui prend en charge la

détection des relations entre le corps et l'espace. Ce système peut vraisemblablement effectuer une projection sur l'hippocampe en empruntant deux voies distinctes. La première voie serait concernée par les rotations de la tête alors que la seconde serait dépendante d'une population de neurones qui codent la direction statique de la tête dans l'espace (Taube 1995; Taube et Muller, 1998).

2.4 Les stratégies spatiale et réponse

Par la suite, Iaria et ses collègues (2003) se sont questionnés sur la relation entre le volume hippocampe et la stratégie de navigation chez l'être humain. Ils ont démontré, en enregistrant l'activité cérébrale par IRMF, que l'être humain adopte spontanément une stratégie de navigation lorsque celui-ci doit s'orienter dans un environnement donné. Les structures responsables des stratégies allocentriques et égocentriques ont respectivement été localisées dans l'hippocampe et le striatum (plus précisément les noyaux caudés dans ce dernier cas) (Packhard, Hirsh, & White, 1989; Hartley, Maguire, Spiers & Burgess, 2003; Iaria & al., 2003; Dahmani & Bohbot, 2015). Les stratégies de navigation « allocentrique » et « égocentrique » découvertes par O'Keefe et Nadel ont ensuite été renommées respectivement « spatiale » et « réponse » (Bohbot, Lerch, Thorndyrcraft, Iaria & Zijdenbos, 2007). Dans cette dernière étude, Bohbot et ses collègues ont testé de jeunes adultes en santé en utilisant un paradigme expérimental utilisé dans la littérature : celui du labyrinthe 4 sur 8 (détaillé dans la partie suivante et dans la section 4.2.1). En analysant les volumes de ces structures à l'aide de la « Voxel-

based Morphometry » (VBM), les chercheurs en sont venus à la conclusion que les apprenants réponses avaient moins de matière grise dans l'hippocampe que les apprenants spatiaux. Les sujets de type réponse avaient toutefois davantage de matière grise dans les noyaux caudés, ce qui suggère une interaction compétitive entre ces deux structures cérébrales.

2.5 Le Labyrinthe virtuel 4 sur 8 (4 on 8)

Le labyrinthe 4 sur 8 s'est avéré être l'outil de prédilection pour cette étude considérant plusieurs facteurs. Le facteur principal s'explique par le fait qu'il s'agit d'un moyen validé par neuroimagerie permettant de discriminer la stratégie de navigation spontanée d'un individu (Iaria, Petrides, Dagher, Pike & Bohbot, 2003; Bohbot, Lerch, Thorndyraft, Iaria & Zijdenbos, 2007; West et al., 2015). Le 4 sur 8 fait partie des plusieurs modèles disponibles de labyrinthes virtuels, qui font un compromis entre validité écologique et faisabilité en milieu de laboratoire. D'autres types de labyrinthes sont également employés dans la littérature. Par exemple, certains chercheurs ont employé un labyrinthe virtuel à jonctions T (Kahana, Sekuler, Caplan, Kirschen & Madsen, 1999; Bischoff & Boulanger, 2003). Un labyrinthe à jonctions T est constitué par une succession de plusieurs intersections offrant le choix au participant de tourner à gauche ou à droite à chaque embranchement. Le participant doit apprendre la bonne combinaison de chemins à prendre afin d'arriver à destination. Un autre type de labyrinthe utilisé serait la ville virtuelle (Gillner & Mallot, 1998; Etchamendy et Bohbot,

2007; Dahmani, Ledoux, Boyer, Bohbot, 2011). Il s'agit d'un labyrinthe reconstituant une situation réaliste (ex : se promener dans une ville avec des rues, des bâtiments, etc...) dans laquelle le participant doit généralement avoir recours à des points de repère dans l'environnement pour naviguer à travers une succession de chemins différents pour arriver à l'objectif. Un troisième type de labyrinthe virtuel utilisé est inspiré du « Morris Water Maze ». Le participant est placé dans une salle dans laquelle des points de repère externes sont visibles via des fenêtres. Le sujet doit alors se servir de ces points de repère pour apprendre l'endroit dans la salle où se trouve la plateforme invisible qu'il doit atteindre pour réussir la tâche (Skelton, Ross, Nerad & Livingstone, 2006; Cornwell, Johnson, Holroyd, Carver & Grillon, 2008).

2.6 L'activité des ondes thêta mesurée par analyse fréquentielle

Les analyses fréquentielles constituent une quantification par des méthodes de traitement du signal électrique enregistré sur le scalp par EEG en signal physique en utilisant certaines techniques, comme la transformation de Fourier par exemple. Il s'agit d'une parcelle de l'amplitude (et de la phase) de chaque fréquence enregistrée (Luck, 2005).

2.6.1 Les ondes thêta et la navigation

Des études ont démontré que l'apparition des ondes thêta n'est pas liée qu'au sommeil (comme dans le cas du « rapid-eye movement » ou de la phase 1 du sommeil), mais également à la navigation spatiale (Araújo, Baffa et Wakai, 2002; Winson, 1978;

Vanderwolf, 1969; Grastyan, Lissak, Madarasz & Donhoffer, 1959; Green & Arduini, 1954). Des chercheurs ont remarqué l'apparition d'un montant considérable d'ondes thêta lors de test impliquant la navigation spatiale chez des rats à qui une canule a été implantée (Kahana, Sekuler, Caplan, Kirschen & Madsen, 1999). Bischoff et Boulanger (2003) ont par la suite testé la navigation spatiale en milieu virtuel chez les êtres humains dans un labyrinthe à jonctions T. Les participants devaient apprendre une séquence leur permettant de se rendre à la fin du labyrinthe sans commettre d'erreur de parcours. Les chercheurs ont administré aux participants cinq des dix labyrinthes disponibles choisis au hasard. Chaque labyrinthe est composé de dix séquences où le participant peut tourner soit à droite, soit à gauche dans chaque embranchement. Il doit apprendre le bon chemin à prendre à chaque embranchement lors de différents essais. Chaque labyrinthe est présenté au participant dans sa forme de « pratique », où des flèches sur les murs indiquent la bonne direction à prendre. Une fois terminé, le même labyrinthe est par la suite présenté sous la forme de test, c'est-à-dire que les flèches sont enlevées. Si le participant choisit la mauvaise direction, il entre en collision avec un mur invisible et ceci est donc considéré comme une erreur. Chaque labyrinthe « test » est présenté un maximum de huit fois, ou jusqu'à ce que le participant arrive à se rendre à la fin sans entrer en contact avec un mur invisible, selon laquelle de ces deux situations se produisait en premier. Les participants ont été divisés en deux groupes expérimentaux : l'un naviguant dans des labyrinthes dont les murs sont uniformes, et l'autre dans des labyrinthes divisés en sections dont les murs sont de couleurs différentes. Selon l'étude, les participants ayant été assignés aux labyrinthes avec des

murs uniformes font moins d'erreurs, puisque la quantité d'information à retenir est moins importante (ex : « Gauche/Droite/Gauche » au lieu de « À gauche au premier embranchement bleu, à droite au second embranchement bleu, puis à gauche au premier embranchement rouge »). Une carte virtuelle du labyrinthe a été dressée, divisant ce dernier en sections cubiques égales, permettant de lier le niveau d'activité thêta au temps écoulé et à la position du participant dans le labyrinthe. Il est donc possible de connaître le niveau d'activité thêta du participant dans un endroit précis à un moment spécifique dans sa progression à travers le labyrinthe. En observant certaines sections, les chercheurs ont remarqué que des pics d'activité thêta survenaient lorsque les participants tournaient un coin pour faire face à une nouvelle allée ou lorsqu'ils réalisaient qu'ils avaient commis une erreur et lorsque celle-ci était rectifiée. Cette découverte laisse croire que l'activité thêta est non seulement associée à l'encodage de l'information visuo-spatiale (lors de la phase de mémorisation du labyrinthe), mais également de la récupération d'information en mémoire spatiale (lors d'essais sonde, où le participant devrait traverser le labyrinthe sans commettre d'erreurs) (Bischoff et Boulanger, 2002; Klimesch, Doppelmayr, Russegger et Pachinger, 1996).

2.6.2 Les ondes thêta et le labyrinthe 4 sur 8

Une étude préalable effectuée à l'aide d'un électroencéphalogramme et du labyrinthe 4 sur 8 démontre que les apprenants spatiaux émettent davantage d'activité thêta que les

apprenants réponses. Cela s'avère vrai même dans le cas d'une tâche contrôle (le participant contrôle effectuait le labyrinthe 4 sur 8 tout en comptant à l'envers à partir de 1000 par bonds de 3 afin d'entraver partiellement l'acquisition de stratégie de navigation). Selon l'auteur, une hypothèse possible serait que les apprenants spatiaux possèdent une faculté d'acquisition d'information spatiale absente chez les apprenants réponses, si l'on considère l'association préalable des ondes thêta avec l'apprentissage spatial. (Falk et al., 2014).

2.7 Le lien entre les jeux vidéo et les stratégies de navigation

La littérature démontre que différents types de jeux vidéo tendent à avoir une influence différente sur la stratégie de navigation instinctivement utilisée par une personne.

2.7.1 Types de jeux vidéo et volume des structures cérébrales

Il est connu que jouer à des jeux vidéo d'action à la première personne augmente fortement les chances d'utiliser instinctivement une stratégie de navigation réponse (81% des aVGP utilisent instinctivement une stratégie de type réponse lorsqu'ils sont testés à l'aide du labyrinthe 4 sur 8) par rapport à des non-joueurs de jeux vidéo (seulement 42% des nonVGP utilisent instinctivement une stratégie de type réponse lorsqu'ils sont testés à l'aide du labyrinthe 4 sur 8) (West et al., 2015). Bien que la quantité de matière grise dans l'hippocampe et les noyaux caudés ait une influence sur

la stratégie de navigation utilisée au quotidien, certains types de jeux vidéo semblent amener leurs utilisateurs à favoriser une stratégie particulière lorsqu'ils jouent à ceux-ci. Des études laissent croire qu'un entraînement aux jeux vidéo peut amener les sujets à modifier le type de stratégie utilisée en dehors du monde virtuel (Bohbot, 2014; West et al., 2015; Sodums, 2016). Les facteurs précis influençant cette prédominance restent cependant à investiguer. Les jeux vidéo d'action sont connus comme ayant une influence significative sur la croissance du volume de matière grise dans le striatum (West et al., 2015). Dans une autre perspective, il a été démontré qu'il est possible d'utiliser les jeux vidéo de type plateforme pour augmenter de manière significative la quantité de matière grise présente dans l'hippocampe (Kühn, Gleich, Lorenz, Linderberger & Gallinat, 2014). Dans un jeu vidéo de type plateforme, le joueur contrôle un personnage, généralement à la troisième personne (le point de vue du joueur est par défaut derrière le personnage, regardant vers l'avant, à une distance permettant de voir le personnage en entier. Le jeu à la troisième personne s'oppose à un jeu à la première personne, où le joueur observe le monde à travers les yeux du personnage). Le joueur doit naviguer à travers différents petits mondes afin d'accomplir un objectif précis, tout en évitant pièges et obstacles en chemin. À la suite de 50 heures d'entraînement durant lesquels les participants devaient noter leur progression quotidienne, les chercheurs ont démontré une variation significativement différente entre les groupes. L'augmentation de la matière grise est significativement supérieure chez les participants utilisant une stratégie spatiale et chez les participants utilisant d'abord une stratégie réponse avant de changer pour une stratégie spatiale par rapport aux participants utilisant uniquement

une stratégie réponse. Les participants actifs ont été comparés à un groupe contrôle. Les différences de matière grise ont été déterminées à l'aide de la « Voxel-based Morphometry » (VBM) pré et post entraînement.

2.7.2 Différences entre joueurs et non-joueurs

Il a également été démontré que les jeux vidéo peuvent avoir une influence sur la capacité d'un sujet à résoudre une tâche de navigation (Ventura, Shute, Wright et Zhao, 2013). L'expérience d'un sujet en termes de temps passé à jouer à des jeux vidéo aura d'ailleurs un impact plus important qu'une exposition récente (Murias, Kwok, Castillejo, Liu et Iaria, 2016; Kühn et Gallinat, 2014). Murias et ses collègues (2014) en sont arrivés à cette conclusion en administrant à des participants VGP et des participants nVGP un test de navigation en milieu virtuel. Les sujets étaient placés dans un musée virtuel contenant diverses salles décorées avec une thématique différente. Les participants devaient naviguer entre les différentes salles aussi rapidement que possible. Ils ont également découvert que les VGP tendent à utiliser des stratégies plus efficaces que les nVGP comme l'utilisation de cartes cognitives ou l'adoption d'approches procédurales en ce qui concerne les chemins qui ont été appris. Considérant l'usage dont ces deux stratégies ont fait preuve, les auteurs semblent indiquer qu'il peut y avoir un effet de transfert pratique entre les compétences acquises lors de sessions passées à jouer à des jeux vidéo et la réalité récente (Murias, Kwok, Castillejo, Liu et Iaria, 2016; Kühn et Gallinat, 2014).

3. Hypothèses

L'ensemble des données de la littérature me permet donc d'établir les liens entre navigation spatiale et structures cérébrales. Ces liens, qui ont été établis à l'aide d'IRMf et par des analyses fréquentielles en EEG, ont révélé que les jeux vidéo de type plateforme pouvaient avoir une influence significative sur le volume hippocampique. Du fait de l'influence de l'entraînement des jeux vidéo sur ces réponses cérébrales, cette étude investigate l'hypothèse générale suivante : l'entraînement à des jeux vidéo va avoir une influence sur l'activité cérébrale. D'un point de vue opérationnel, cette étude pose les hypothèses que :

- 1- La navigation dans un milieu virtuel provoquera une augmentation significative des ondes de type « thêta » visible à l'aide d'un électroencéphalogramme chez des sujets nVGP.
- 2- L'augmentation des ondes de type « thêta » sera significativement supérieure chez les sujets nVGP utilisant une stratégie de navigation de type « spatiale » (qui dépend de l'hippocampe) comparativement à des sujets nVGP utilisant une stratégie réponse (qui dépend du striatum, plus précisément des noyaux caudés). La stratégie de chaque participant a été déterminée par le test « Labyrinthe virtuel 4 sur 8 ». L'augmentation sera produite par une tâche de navigation virtuelle et perceptible sur des données électroencéphalographiques.

4. Matériel et Méthodes

4.1 Participants

Des données ont été prélevées sur 39 sujets pour l'expérience. Les participants sont tous âgés entre 18 et 32 ans et droitiers. Il est également exigé que les sujets n'aient aucun historique de trouble psychologique ou neurologique, incluant les troubles d'apprentissage. En ce qui concerne leurs habitudes de jeu, les participants ne doivent jamais avoir joué à des jeux vidéo plus de 3 heures par semaine et ne jamais avoir joué à « Super Mario 64 ». Les participants doivent avoir une vue et une ouïe normale/corrigée. Il est également essentiel qu'ils n'aient subi aucune anesthésie générale et n'aient consommé aucun médicament agissant sur le système nerveux central durant les six derniers mois. Les sujets ne doivent consommer aucune drogue sur une base régulière. Il est également demandé qu'ils n'aient subi aucune commotion cérébrale depuis 5 ans. Les participants ne doivent avoir ni tresses ni « dreadlocks », puisque cela peut nuire au contact entre les électrodes et le cuir chevelu. Les sujets ne doivent avoir participé à aucune étude sur les jeux vidéo à L'Université de Montréal et aucune étude sur la mémoire à l'Institut Douglas, afin d'éviter que les participants aient eu un contact préalable avec les tests utilisés. Les participants ont tous donné leur consentement libre et éclairé. Les participants ont été recrutés de façon volontaire. Des annonces ont été rédigées et placées en ligne sur des sites d'annonce classées comme Kijiji ou Craigslist. Certaines affiches ont également été mises en place dans le pavillon Marie-Victorin de l'Université de Montréal. La compensation était de 75\$ pour une participation complète à deux sessions d'environ trois heures chacune. Les participants

ont été répartis en deux groupes expérimentaux selon leurs résultats dans le test du labyrinthe 4 on 8 : Le groupe spatial et le groupe réponse.

Démographie	Apprenants Spatial (N=18)	Apprenants Réponse (N=21)
Sexe (F/H)	13/5	17/4
Âge Moy. (É-T)	24.8 ans (3.6)	24.2 ans (3.6)
Scolarité (É-T)	17.1 années (3.1)	15.7 années (2.7)
Langue (Fr/Eng)	13/5	12/9

Tableau 1 : Démographie des participants

Des test-t pour échantillons indépendants ainsi que des tests de khi-carré de Pearson ont été effectués sur les caractéristiques démographiques des participants. Les test t n'ont révélé aucun effet significatif entre la stratégie spontanée et l'âge ($t = 0,47$; $p = 0,641$), le nombre d'année de scolarité ($t = 1,454$; $p = 0,154$), la langue utilisée pendant la passation ($t = -0,965$; $p = 0,341$) ou le sexe de participant ($t = -0,239$; $p = 0,813$). Les tests khi-deux de Pearson effectués n'ont également révélé aucun lien entre la stratégie spontanée et l'âge (Khi-carré= 8,160; $p = 0,833$), le nombre d'années de scolarité (Khi-carré= 10,038; $p = 0,527$), la langue utilisée pendant la passation (Khi-carré= 0,958; $p = 0,328$), ou le sexe de participant (Khi-carré= 0,060; $p = 0,807$).

4.2 Tâches expérimentales

Lors de la première session, le labyrinthe 4 sur 8 est administré, puis le labyrinthe paires recombinaisons, et ensuite la navigation dans la ville virtuelle. La rencontre est clôturée par

un entraînement aux contrôles sur le jeu « Super Mario 64 ». Lors de la seconde session, les tests sur le jeu « Super Mario 64 » avec enregistrement EEG seront administrés au participant.



Figure 1: Ordre standard des tests administrés

4.2.1 Le Labyrinthe virtuel 4 sur 8 (4 on 8)

Basé sur les découvertes d'O'Keefe et Nadel (1978), Le Labyrinthe 4 sur 8 est un labyrinthe virtuel créé à partir d'un jeu vidéo commercial (Unreal, Epic Games, Raleigh, NC) (Iaria, Petrides, Dagher, Pike et Bohbot, 2003). Ce programme a été conçu afin de permettre d'identifier quelle stratégie de navigation est utilisée par un sujet lorsque celui-ci doit s'orienter dans un environnement donné.

4.2.1.1 Composition du 4 sur 8

Le labyrinthe 4 sur 8 est composé d'une plateforme de laquelle partent huit chemins différents. Différents points de repère y sont disponibles (Annexe 9.1) comprenant un arbre, un rocher, une montagne, une vallée ainsi que des nuages. Le test comprend jusqu'à dix essais, chacun divisé en deux phases. La phase un pouvant être qualifiée de

phase « d'apprentissage » et la phase deux de phase de « test ». Les différences entre les deux types de phases seront détaillées au prochain paragraphe. Chaque phase d'apprentissage est étiquetée « .1 » (ex : 1.1, 2.1, etc...) et chaque phase de test, « .2 » (ex : 3.2,8.2, etc...). Les essais sont essentiellement répartis en trois modèles distincts. Les deux premiers modèles (A et B), sont chacun une variante de la même carte où les objets sont placés dans différentes allées. Dans le modèle C (utilisé pour l'essai sonde), la phase d'apprentissage (9.1) est identique à celle du modèle A. Par contre, tous les points de repère évidents sont supprimés dans la phase de test (9.2).

4.2.1.2 Phases d'apprentissage et de test

La phase d'apprentissage de chaque essai présente au sujet huit allées, dont seulement quatre sont accessibles. Le participant doit visiter les allées accessibles et récupérer les objets situés dans une fosse, au bout de ces allées. Une fois les objets récupérés, le participant reçoit comme instruction de retourner au centre de la plateforme, de mémoriser ensuite dans quelles allées sont situés les objets et qu'il devra éviter ces allées dans la phase suivante. Une fois que le participant signale à l'expérimentateur qu'il a adéquatement mémorisé l'emplacement des objets, la phase de test de l'essai en cours lui est présentée. Lors de la phase de test de chaque type d'essai, toutes les allées sont accessibles et le participant doit aller chercher les objets dans les allées qu'il n'a pas visitées lors de la phase d'apprentissage, c'est-à-dire celles qui étaient inaccessibles (Iaria, Petrides, Dagher, Pike et Bohbot, 2003).

4.2.1.3 Les types d'erreurs

Trois types d'erreurs peuvent être commises par le participant. Premièrement, l'erreur de type « Reference Memory (RM) » signifie que le participant a visité un chemin ne contenant aucun objet dans la phase actuelle, mais en contenait un dans la phase d'apprentissage. Ensuite, l'erreur de type « Working Memory Incorrect (WMI) » signifie que le participant a revisité une allée qui ne contenait aucun objet pour une seconde fois ou plus pendant la phase actuelle. Finalement, l'erreur « Working Memory Correct » veut dire que le participant a revisité une allée dans laquelle il a déjà collecté un objet pendant la phase actuelle. Ces trois types d'erreurs peuvent être commises lors de la phase de test, mais seule l'erreur WMc peut être commise lors de la phase d'apprentissage (puisque les allées ne contenant aucun objet sont inaccessibles). L'alternance entre les phases d'apprentissage et de test est répétée au minimum à 3 reprises avant l'essai sonde, totalisant trois essais.

	Cartes	Modèle Suivi	Description
	1.1/1.2	A	Essai Standard
	2.1/2.2	B	Essai « Distraction »
Nombre d'essai minimal. Si le sujet à réussi une carte « .2 » sans erreur, lancer la carte 9.1. Sinon, continuer jusqu'à ce qu'une carte « .2 » soit réussi sans erreur.	3.1/3.2	A	Essai Standard
	4.1/4.2	A	Essai Supplémentaire
	5.1/5.2	A	Essai Supplémentaire
	6.1/6.2	A	Essai Supplémentaire
	7.1/7.2	A	Essai Supplémentaire
Nombre d'essai maximal. Si le sujet n'a réussi aucune carte « .2 » sans erreur, cesser le testing.	8.1/8.2	A	Essai Supplémentaire
	9.1/9.2	C	Essai Sonde
	10.1/10.2	A	Essai Post-Sonde

Tableau 2 : Format des cartes du labyrinthe 4 sur 8. Se référer à la figure suivante pour le modèle des cartes.

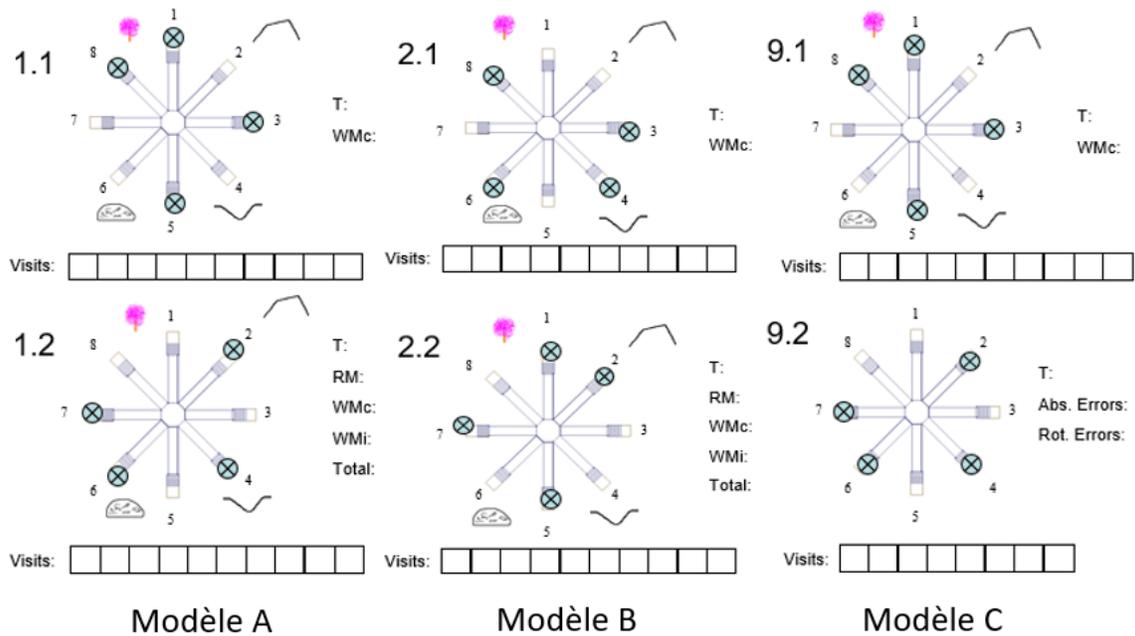


Figure 2 : Les différents modèles de cartes du labyrinthe 4 sur 8. Les « X » indiquent l'emplacement des objets à ramasser. Le modèle « C » est très similaire au modèle « A », à l'exception que le modèle « C » ne comporte aucun point de repère pour aider le participant à s'orienter sur la carte 9.2 (voir Annexe 9.1). Les pictogrammes qui composent cette image proviennent de documents qui ont été fournis par le laboratoire de Véronique Bohbot, professeure associée au département de psychiatrie de l'Université McGill.

À l'exception du deuxième essai (cartes 2.1 et 2.2), les objets sont situés dans les chemins 1,3,5,8 dans chaque phase d'apprentissage et dans les chemins 2,4,6,7 lors de la phase de test dans chacun des essais (cartes commençant par 1,3,4,5,6,7,8,9,10). Afin d'encourager un effet d'apprentissage chez le participant en minimisant les risques qu'il ne s'aperçoive que les objets sont aux mêmes emplacements lors des mêmes phases dans les autres types d'essais, les objets ont été changés d'emplacement lors du deuxième essai. Ceux-ci sont situés dans les chemins 3, 4, 6 et 8 lors de la phase d'apprentissage et dans les chemins 1, 2, 5, 7 durant la phase de test. Afin d'accéder à

l'essai sonde, le participant doit réussir une des phases de test en ne commettant aucune des erreurs mentionnées précédemment.

4.2.1.4 L'essai sonde

L'essai sonde constitue le troisième type de modèle du labyrinthe 4 sur 8. Les objets sont situés dans les mêmes allées que le premier type d'essai (modèle A), qui s'avère être le type le plus administré au participant (qu'il aura mémorisé lors des cartes 1 et 3 s'il a atteint le critère minimum avant de terminer l'essai trois, et possiblement lors des cartes 4,5,6,7 et 8 jusqu'à ce que le critère ait été atteint). Néanmoins, la phase de test de l'essai sonde supprime la totalité des points de repère auparavant disponible pour le participant, autant en premier plan (arbre, pierre) qu'en arrière-plan (montagne, nuage, etc...). Afin de ne pas biaiser la stratégie du participant, des objets sont présents dans toutes les allées. L'essai se termine lorsque le participant a ramassé quatre objets, qu'ils soient les bons ou non. Toutefois, lorsqu'un participant ramasse un objet n'étant pas dans les allées 2,4,6 ou 7 (celles dont il devait mémoriser lors de la phase d'apprentissage précédente comme étant les allées où il devait se rendre lors de cette phase), cela est considéré comme une erreur absolue.

4.2.1.5 La cotation de l'essai sonde

Les erreurs absolues sont l'un des deux types d'erreurs comptabilisées lors de l'essai sonde avec les erreurs rotationnelles. Le nombre d'erreurs rotationnelles constitue un indice qui indique le degré avec lequel le participant a appris dans quel « pattern » les objets sont situés. Un taux d'erreur rotationnelle nul ou faible est plus typique des participants réponses, car ce type de schématisation mentale est davantage compatible avec une stratégie qui dépend d'un apprentissage de séquences motrices. Par exemple, un participant ayant été dans les allées 3,5,7 et 8 au lieu de 2,4,6 et 7 est probablement réponse, car il semble avoir appris des séquences prémotrices (se rendre dans une allée, puis dans celle deux allées plus loin, puis celle deux allées plus loin et celle d'à côté) mais s'est sans doute trompé de point de départ. Il est rare que les participants utilisant une stratégie spatiale obtiennent un faible taux d'erreurs rotationnelles, car ils ne se fient qu'exclusivement aux relations spatiales entre les points de repère et les objets pour s'orienter. L'essai sonde permet d'aider l'examineur à identifier la stratégie du participant, puisque les sujets utilisant une stratégie spatiale dépendent davantage des points de repère que les sujets utilisant une stratégie typiquement réponse. Le nombre d'erreurs que le sujet commet durant l'essai sonde a été démontré comme étant proportionnel à la quantité de matière grise dans l'hippocampe et inversement proportionnel à la quantité de matière grise dans les noyaux caudés (Iaria, Petrides, Dagher, Pike et Bohbot, 2003).

4.2.1.6 Déroulement du labyrinthe 4 sur 8

Le sujet est préalablement placé dans un labyrinthe radial à huit chemins équidistants (Annexe 9.1) que l'on nomme phase d'habituation. Ce labyrinthe sert d'entraînement afin de s'habituer à la navigation en trois dimensions sur ordinateur et afin d'éviter que l'expérience principale ne soit biaisée par des facteurs reliés à une sous-exposition aux jeux vidéo comme des nausées ou un manque d'expérience avec les contrôles de navigation. La phase d'habituation ne contient aucun point de repère afin d'éviter tout effet d'amorçage ou incitation préliminaire à la sélection de la stratégie qui sera employée. Ce test est composé d'étapes définies afin d'apprendre la navigation au participant et permet de s'assurer que le sujet aura acquis une certaine aisance avec le processus de navigation avant d'être exposé à tout élément qui pourrait influencer son choix de stratégie, puisque la présence ou l'absence d'éléments pour se repérer jouera également un rôle dans l'acquisition de celle-ci. Lorsque l'expérimentateur décide que le sujet semble suffisamment à l'aise avec la navigation en milieu virtuel, le test est entamé. Les trois premiers essais sont alors administrés au participant. Si l'une des phases de test est réussie sans erreur, on administre alors au participant l'essai sonde. Sinon, des essais supplémentaires sont administrés jusqu'à ce qu'un essai test soit réussi sans erreur, ce qui dénote un apprentissage de l'emplacement des objets de la part du participant. Advenant que le critère ne soit pas atteint après huit essais au total, l'expérience arrête, puisque l'examineur ne sera pas en mesure d'identifier une stratégie de navigation qui n'est pas biaisée chez le participant. L'essai sonde est arrêté après que le participant ait ramassé quatre objets, que ce soit les objets cibles ou non.

Cette mesure est administrée afin que le participant ne se rende pas compte que des objets sont présents dans toutes les allées et afin que l'examineur puisse observer la flexibilité de sa stratégie de navigation à l'essai suivant. Lorsque l'essai sonde est terminé, un dernier essai correspondant au modèle A (cartes 10.1 & 10.2) est administré au participant afin de vérifier si l'essai sonde aura eu une influence sur le type de stratégie qu'il choisit d'utiliser. À la suite de ce test, une brève entrevue d'une dizaine de minutes est alors proposée au participant afin de poser des questions clés permettant de mieux cerner sa stratégie de navigation (Annexe 9.2). L'entrevue est enregistrée avec l'accord verbal du participant. Le participant est informé que les données seront détruites sept ans après la fin de l'étude. Parmi les questions importantes pour déterminer la stratégie de navigation, la première question demandée aux participants est : « Comment avez-vous fait pour apprendre quelles allées emprunter et lesquelles éviter? ». Celle-ci permet entre autres de déterminer si le participant a ou non utilisé des points de repère pour s'orienter, ce qui permet d'avoir une idée préliminaire de la stratégie utilisée. On demande ensuite : « Pouvez-vous me dire, étape par étape, qu'est-ce qui se passait dans votre tête alors que vous faisiez la tâche? Est-ce que vous pouvez me donner un exemple concret? », ce qui permet au participant d'expliquer sa démarche de manière beaucoup plus précise (s'il a ou non numéroté les allées pour se rappeler où se rendre, par exemple). La troisième question posée est « Avez-vous utilisé cette tactique durant tous les essais, du début à la fin? » permet de savoir si le participant a changé de stratégie à un certain point de l'expérience. La dernière question importante consiste à demander au participant, si, selon lui, sa position de départ était

toujours la même ou non (s'il faisait toujours face à la même allée lorsqu'il commençait un essai), puisque le fait d'être conscient que la position de départ est toujours la même est essentiel à certaines stratégies. À la fin de cette entrevue, on demande au participant de dessiner une vue du haut de la plateforme ainsi que tous les points de repère dont il peut se rappeler ainsi que leur position relative.

4.2.2 Labyrinthe Paires Recombinées (Pairs Recombined)

Par la suite, on administre au participant le test du labyrinthe paires recombinaées. Son but est de compléter le labyrinthe 4 sur 8 en positionnant le participant dans un environnement favorable à la stratégie de navigation allocentrique et d'observer sa réaction (Etchamendy, Konishi, Pike, Marighetto, Bohbot, 2012; Konishi et al., 2013). Plus précisément, cette tâche permet d'évaluer la flexibilité mnésique dont un sujet dispose lors d'un essai sonde. Cette flexibilité sera influencée par la capacité du sujet à faire des liens entre les points de repère de son environnement. Il a d'ailleurs été démontré que, bien qu'une activation spontanée de l'hippocampe ne soit pas essentielle pour apprendre à mémoriser les chemins à prendre lors des essais d'apprentissage, elle est cruciale pour une bonne flexibilité mnésique lors de l'essai sonde (Etchamendy, Konishi, Pike, Marighetto, Bohbot, 2012). L'utilité de la flexibilité mnésique sera abordée dans le passage concernant l'essai sonde de ce test. De la même origine que le labyrinthe 4 sur 8, cet environnement virtuel est également un labyrinthe radial. Ce dernier dispose néanmoins de douze branches, séparées en six

paires de deux chemins. Pour les deux premières phases (phase d'apprentissage et phase de l'essai sonde), le test présente une paire de chemins à la fois au participant. Le sujet est informé qu'il doit apprendre dans chaque paire de chemins lequel contient un objet. Le sujet est informé que, pour chaque paire, l'un des chemins contient toujours un objet, tandis que l'autre est toujours vide. Les objets seront constamment dans les mêmes chemins pour la totalité de la durée du test. Il est à noter que le participant ne dispose que d'une tentative pour chaque paire de chemins peu importe la phase et ne peut revenir sur ses pas une fois qu'il a investi le chemin, même s'il est certain de s'être trompé. Les autres paires de chemins sont dissimulées derrière des murs. Lorsqu'il est arrivé au bout du chemin, le participant est transporté de nouveau à son point de départ, qu'il ait choisi le bon chemin ou non. Une nouvelle paire lui est alors présentée. À chaque fois qu'une nouvelle paire de chemins est présentée, un mur dissimulant une paire de chemins descend rapidement jusqu'à disparaître et révéler les chemins en question. Chaque tentative est chronométrée à des fins statistiques du moment que le mur est complètement disparu jusqu'au moment où le participant franchit le palier menant dans un chemin (Ce qui permet de mesurer le temps de leur prise de décision). Bien que le participant ne soit pas explicitement averti que sa performance est chronométrée, il est assumé que celui-ci s'en rend compte à un moment ou à un autre, puisque la mesure est effectuée à l'aide d'un chronomètre à main et n'est pas activement dissimulée. À chaque paire de chemins est attribué un point de repère visuel (des pyramides, un étang, des arbres, une colline, etc...) en arrière-plan que le participant doit utiliser afin de se repérer. Puisque les différentes paires de chemins sont

présentées dans un ordre prédéterminé, mais jamais dans le même ordre deux fois d'affilée (cette séquence reste inconnue pour le participant, il ne peut la prévoir d'avance), ce dernier ne peut utiliser une stratégie réponse puisqu'il est impossible de retenir une séquence motrice. Il est donc forcé d'adopter une stratégie spatiale pour atteindre le critère. Le critère à atteindre pour passer à la phase de l'essai sonde est que le sujet doit collecter onze objets sur deux essais consécutifs de six paires de chemins chacun, ce qui totalise une possibilité de douze tentatives. Le participant dispose d'un total de vingt-cinq essais pour atteindre le critère. Si le critère n'est pas atteint dans ces délais, le test s'arrête. Dans le cas contraire, le sujet passe à la phase de l'essai sonde. Lors de l'essai sonde, l'emplacement des objets reste statique. Néanmoins, les paires des chemins présentées au participant sont décalées d'un chemin dans le sens horaire (par exemple, la paire qui était constituée du chemin #1 et #2 est désormais présentée comme la paire de chemins incluant les chemins #2 et #3 (voir figure 3)). C'est par ce décalage qu'il est possible d'évaluer la flexibilité mnésique des sujets. Une impossibilité à s'adapter adéquatement à ce changement révèle que les apprentissages des relations stimulus-réponse du sujet sont rigides. Ce test permet donc de différencier les apprenants réponses qui sont capables de flexibilité vers une stratégie spatiale de ceux qui ne le sont pas (Etchamendy, Konishi, Pike, Marighetto, Bohbot, 2012; Konishi & al., 2013). Il est généralement plus facile pour les participants utilisant une stratégie spatiale de s'orienter durant l'essai sonde. L'utilisateur de la stratégie spatiale saura associer plus précisément la position du point de repère avec le chemin dans lequel il doit se rendre, alors que l'utilisateur de la stratégie réponse aura davantage de difficulté à faire

de même. Le raisonnement derrière la stratégie réponse tend à amener l'apprenant à prendre le chemin de droite lorsqu'il voit la pyramide, par exemple. Puisque les chemins ont été décalés, cela ne constitue plus la bonne réponse. Deux essais de quatre tentatives chacun sont présentés durant cette phase. La façon de chronométrer cette phase est identique à celle de la phase d'apprentissage. La troisième phase, ou phase libre est identique à la première, à l'exception du fait que tous les murs sont enlevés. Le participant doit alors récupérer un maximum d'objet sur six tentatives. Le test de phase libre est administré deux fois. Cette phase est chronométrée à partir du moment qu'elle débute jusqu'à la fin de la sixième tentative.

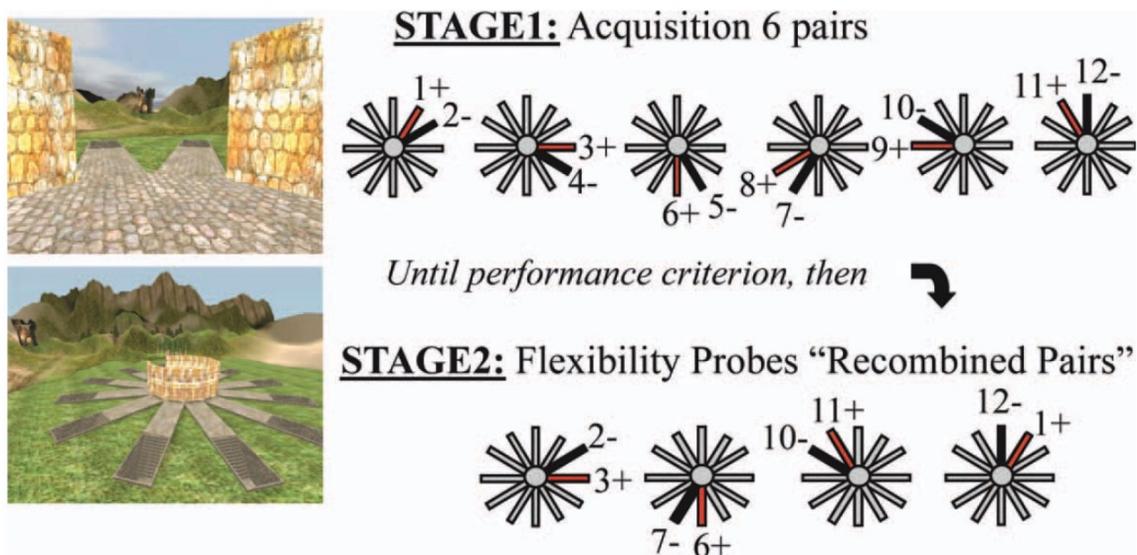


Figure 3 : Décalage des chemins lors de l'essai son du labyrinthe paires recombinaées (Etchamendy, Konishi, Pike, Marighetto et Bohbot, 2012).

4.2.3 Navigation dans une ville virtuelle (Wayfinding)

Le participant est ensuite placé dans une ville virtuelle. Cette ville est composée de plusieurs bâtiments, dont certains sont des objectifs à trouver. Les bâtiments de type « objectifs » ont été disposés de façon que, lorsque le sujet se trouve à un bâtiment, il ne puisse pas voir les autres bâtiments objectifs. Cela permet d'empêcher le sujet d'utiliser une stratégie réponse, et d'encourager l'utilisation d'une carte cognitive mentale. Tout bâtiment de type « non-objectif » permet de tester la capacité du sujet à s'orienter et augmenter le réalisme lors de la navigation. Les bâtiments objectifs sont plus précisément une école, un restaurant Subway, un dépanneur Couche-Tard, un magasin SAQ, un hôpital, une piscine municipale, un cinéma et un magasin « Future Shop ». Le participant est informé qu'il dispose d'entre vingt et trente minutes pour trouver chacun des bâtiments susmentionnés (au moins deux fois, ce qui n'est pas mentionné au participant, mais doit être vérifié par l'expérimentateur) ainsi que tous les chemins qu'il est possible d'emprunter dans la ville. Il est informé au début du test qu'il va devoir naviguer entre eux par la suite. Dans le cas des deux premières fois où il découvre les bâtiments objectifs, l'examineur mentionne au participant qu'il s'agit d'un bâtiment objectif et son nom. Dans le cas de la piscine, le sujet est encouragé à entrer dans le bâtiment, puisqu'il commencera à l'intérieur de l'objectif lors de la septième phase de l'essai sonde. L'examineur intervient rarement, sauf dans les cas où le participant tend à passer à répétition par les mêmes endroits ou lorsque la fin du temps imparti approche, et qu'il passe près d'un endroit qu'il doit encore explorer, mais

où il ne va pas par lui-même. Lorsque les objectifs sont atteints et que le sujet a eu un minimum de vingt minutes pour naviguer, l'examineur passe à l'essai sonde.



Figure 4 : Capture d'écran de la ville virtuelle (Etchamendy et Bohbot, 2007; Dahmani, Ledoux, Boyer, Bohbot, 2011)

Lors de l'essai sonde, le participant doit partir d'un bâtiment objectif pour se rendre à un autre à huit reprises (chacune de ces reprises constitue une phase). Dans l'ordre, les essais lui demandent de naviguer du cinéma à la SAQ, du Subway à la piscine, de l'hôpital à l'école, du Couche-tard au Future Shop, de la SAQ au Subway, de l'école au cinéma, de la piscine au Couche-tard et du Future Shop à l'hôpital. Avant de commencer l'essai sonde, le participant est informé qu'il doit se rendre à chaque objectif en essayant d'emprunter le chemin le plus court possible et que sa performance sera

chronométrée, mais que le temps pour effectuer la tâche est d'importance secondaire. L'expérimentateur insiste ensuite sur le fait que l'objectif principal est de prendre le chemin le plus court possible pour arriver à destination. Donc, si le sujet s'égaré, il est plus avantageux pour lui de s'arrêter et tourner sur lui-même pour s'orienter plutôt que de chercher activement dans tous les sens où se rendre. Chaque essai est chronométré du moment que le sujet bouge jusqu'au moment où il touche la façade du bâtiment où il doit se rendre.

4.2.4 Entraînement aux contrôles – Super Mario 64

À la fin de la première session, le participant devra être familiarisé avec les différents contrôles du jeu « Super Mario 64 ». La manette utilisée par le participant est une manette développée par Microsoft pour console de jeu Xbox 360 et Windows (PC). Les contrôles de la manette consistent entre autres d'un « joystick » manipulé par le pouce gauche permettant de diriger les déplacements du personnage du jeu. Ces déplacements sont occasionnellement complétés par l'utilisation du bouton « A » ou bouton « saut », ainsi que le bouton « B » ou bouton « action » (qui permet d'accomplir diverses actions contextuelles). Un autre « joystick » dirigé par le pouce droit (qui alterne entre ce point et les boutons « saut » et « action ») permet de régler la distance ainsi que l'angle de la caméra par rapport au personnage. Ces contrôles constituent l'essentiel des commandes avec lesquelles le chaque participant doit se familiariser. Le sujet disposera d'une période d'environ quinze minutes partiellement

guidée par un examinateur afin de maîtriser les commandes de base qui ont été préalablement définies. Tout temps excédentaire est laissé à la discrétion du participant pour perfectionner sa maîtrise des commandes. Un délai d'une semaine est instauré entre la première et seconde session afin d'éviter tout effet d'exposition lors de l'enregistrement EEG.

4.2.5 Test d'orientation spatiale – Super Mario 64

Enfin, le participant doit passer le test de navigation dans le jeu « Super Mario 64 ». Ce test se divise en huit étapes distinctes, durant lesquelles les données électroencéphalographiques sont enregistrées chez le participant. La première et la septième étape sont les enregistrements « pré-post », durant lesquelles les différences d'ondes cérébrales seront mesurées chez le participant. Ce dernier est donc en état de repos durant cette étape (qui dure dix minutes), et doit fixer une croix blanche au centre d'un écran noir. Le sujet est informé qu'il doit rester aussi immobile que possible et qu'il doit cligner des yeux à son rythme habituel (ne pas se forcer à cligner des yeux ou se retenir de cligner des yeux). Les deuxième, quatrième, et sixième étapes constituent le test d'orientation durant lequel les sujets doivent trouver le plus de pièces rouges possible, jusqu'à concurrence de huit par niveau. Toutes sont préalablement réparties dans chaque niveau. S'il advenait que toutes les pièces soient trouvées, le participant doit ramasser l'étoile bleue qui apparaîtra alors à un endroit prédéterminé dans le niveau. Les trois niveaux se nomment, dans l'ordre administré « Bob-omb Battlefield », « Cool, Cool Mountain » et « Big Boo's Haunt ». Ces niveaux ont été choisis selon leur

pertinence par rapport aux objectifs de l'étude, c'est-à-dire, leur capacité à solliciter les compétences de navigation spatiale des participants. Tous les niveaux du jeu contenant la tâche des huit pièces rouges ont été préalablement testés. Les niveaux jugés non convenables pour la présente étude ont donc été mis de côté pour des raisons qui comprennent non exclusivement une linéarité abondante (ledit niveau est principalement conçu pour que le joueur se rende d'un point A au point B et ne fait donc peu ou pas appel aux compétences de navigation du participant), une taille/difficulté trop minime (les niveaux en question étant trop petits et/ou comprenaient des pièces rouges disposées trop près les unes des autres, ce qui risquait de rendre le temps de collecte trop court et de ne pas solliciter suffisamment les capacités de navigation spatiale des sujets) ou encore une difficulté trop élevée (certaines manœuvres afin d'atteindre les objectifs étaient trop difficiles pour les non-joueurs). Il était présumé que si un participant essayait constamment la même manœuvre pour une durée de temps importante, cela pourrait compromettre significativement la collecte de données puisque ses capacités de navigation spatiale ne seraient pas sollicitées pendant ce temps). Les troisième et cinquième étapes constituent également un état de repos, durant lequel le changement des ondes cérébrales pourra être observé d'une étape à une autre. La tâche et les instructions restent les mêmes qu'aux étapes une et sept, mais la durée est réduite à cinq minutes. La huitième et dernière étape sert à contrôler les effets procéduraux de la tâche. Durant quinze minutes, le sujet doit courir en cercle dans un environnement préalablement visualisé (la cour du château, où le participant débute le jeu) et effectuer des sauts de

manière constante. Le participant reçoit comme instruction que le nombre de sauts qu'il effectue sera comptabilisé et qu'il est important qu'il se consacre à la tâche, bien que celle-ci peut sembler très répétitive. Bien entendu, le nombre de sauts n'est pas réellement comptabilisé, mais l'examineur doit s'assurer que le participant reste bien dédié à effectuer la tâche assignée de manière active afin d'éviter que le participant trouve la tâche trop ennuyante et qu'une hausse importante d'ondes alpha viennent contrebalancer et justifier la baisse d'ondes thêta. Cette étape permettra s'assurer que les changements escomptés sont dus à la navigation spatiale et non aux manœuvres effectuées par le participant. La répétition procédurale et le peu d'éléments disponibles dans le décor lors de cette manœuvre devraient garantir un apprentissage spatial négligeable.

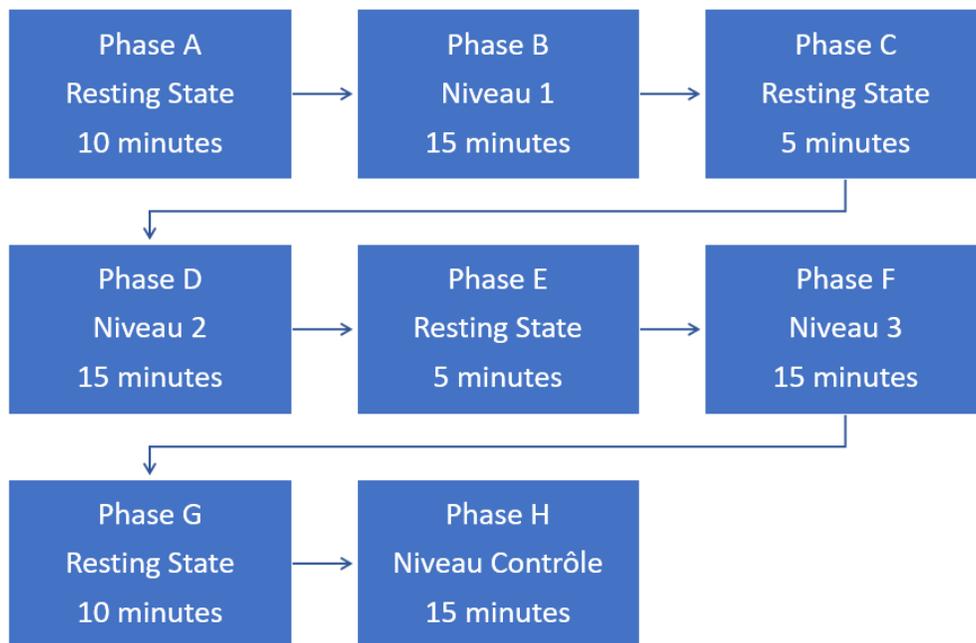


Figure 5: Déroulement du test d'orientation spatiale – Super Mario 64

5. Déroulement de la recherche

Lors de la première session, le participant signe le formulaire de consentement une fois qu'il est informé des modalités de l'expérience. Le test « 4 on 8 » lui est ensuite administré. Une courte entrevue est effectuée afin de déterminer la stratégie de navigation du participant. Cette entrevue est enregistrée avec l'accord du participant afin d'être retranscrite en verbatim une fois la session terminée. Ensuite, les tests des paires recombinaées et de la navigation dans une ville virtuelle sont administrés au participant. Une courte pause peut être effectuée entre ces deux derniers tests si nécessaire. Une fois terminé, le participant doit suivre une courte session d'entraînement de 15 minutes durant laquelle il devra se familiariser avec la manette et le jeu vidéo « Super Mario 64 ». Un protocole de formation est expliqué étape par étape au participant. L'examineur s'assure alors que le sujet comprend chaque commande avant de mettre fin à la session. À noter que cette étape est effectuée afin que le participant acquière une maîtrise élémentaire et instinctive des contrôles du jeu afin d'éviter que celui-ci ne baisse constamment les yeux lors du test qui aura lieu à la prochaine session, ce qui pourrait négativement affecter l'EEG. Cette dernière mesure est prise tenant compte du fait que nos participants sont théoriquement exclusivement des non-joueurs de jeux vidéo, et n'ont donc pas l'habitude de manipuler une manette de jeu. Une prise de rendez-vous est ensuite effectuée par l'examineur pour la seconde session, qui aura lieu une semaine après afin de minimiser l'exposition résiduelle due à l'entraînement lors de l'enregistrement des données par EEG. Lors de la seconde session, un EEG est installé sur le participant. Le sujet est par la suite installé

dans l'une des trois cabines insonorisées qui ont été utilisées durant la période de testing. Chaque cabine est équipée de manière à pouvoir minimiser les interférences électromagnétiques pouvant affecter les signaux de l'EEG.

5.1 Enregistrement par Électroencéphalogramme et Traitement

Afin de procéder à l'enregistrement des ondes cérébrales, cette étude utilisera un électroencéphalogramme, allant de pair avec le programme « Biosemi Active Two ».

L'enregistrement se fera sur 64 canaux actifs à l'aide d'électrodes Ag/AgCL. Les positions des électrodes correspondent au système international 10-10 ainsi que cinq électrodes externes et deux électrodes de référence (grounding). Les électrodes sont montées sur un bonnet élastique. La référence de base pour les 64 électrodes utilisées sera posée sur les mastoïdes gauches et droites (externes 1 et 2). Deux autres électrodes (3 et 4) sont disposées près des canthi externes de l'œil gauche et droit et serviront d'électro-oculogramme horizontal afin de mesurer la différence de voltage et le mouvement horizontal des yeux. La dernière électrode externe (5) est placée sous l'œil gauche et sert d'électro-oculogramme vertical (de concert avec l'électrode Fp1, placée au-dessus de l'œil gauche) afin de détecter les clignements des yeux. L'enregistrement se fait en 1024 Hz. L'analyse des données a été faite à l'aide de Brainvision 2.0. Chaque ensemble de données (incluant les états de repos pré-test, entre les niveaux et post-test) sera filtré à l'aide de seuils, au minimum de 0.5Hz et au maximum de 100Hz. Chaque fichier est fragmenté en plusieurs epochs de deux secondes chacune. Chaque ensemble sera décomposé à l'aide d'une analyse des composantes indépendantes afin d'éliminer les

artéfacts et préparer les analyses statistiques. Le spectrum des canaux et les cartes topographiques associées seront tracés à l'aide de la transformation rapide de Fourier, puis transformés en moyenne FFT. L'emphase sera placée sur les ondes « Thêta » et « Gamma ». Une approche par grappes sera également effectuée afin de renforcer les analyses statistiques. Les composantes indépendantes de chaque ensemble de données seront identifiées et groupées à l'aide des « cartes du cuir chevelu » et des spectres de puissance en utilisant l'analyse des principales composantes.

5.2 Traitement statistique

5.2.1 Entrevue 4 sur 8

La stratégie utilisée sera déterminée à partir d'une entrevue semi-standardisée intégrée et spécifiquement conçue et validée pour le test « labyrinthe virtuel 4 sur 8 ». Les questions posées au sujet permettent de discriminer certains éléments qui vont le relier à une stratégie en particulier selon leurs critères respectifs. Il peut s'agir de la prise de conscience de l'inertie de la position de départ, de la façon dont les points de repère sont utilisés (séquence simple ou multiple), ou encore du changement de stratégie à un moment ou un autre du test, par exemple (Formulaire disponible en Annexe 9.2).

5.2.2 Nettoyage des données

Une fois les correctifs effectués, la puissance moyenne (mean power) mesurée en microvolts (uV) a été exportée pour chaque électrode, sur chaque participant, à chacune des huit étapes de l'entraînement supervisé par EEG. Les données des électrodes nécessaires aux analyses lors de chaque étape (F3, F4, Fz, C3, C4, Cz, P3, P4, Pz, O1, O2, Oz) ont été ensuite importées sur SPSS afin d'effectuer un nettoyage des données extrêmes. Une vérification de l'aplatissement et du kurtosis préalable a été faite sur l'ensemble des électrodes susmentionné pour chaque étape. Par la suite, un score Z a été attribué à la puissance moyenne de chaque électrode, de chaque étape pour chaque sujet. Toute électrode ayant un score Z excédant 2,50 a été retirée des analyses.

L'aplatissement et le kurtosis ont ensuite été revérifiés afin de s'assurer que ceux-ci se situent respectivement entre -2 et 2 ainsi que -7 et 7. Lorsque le nettoyage des données a été complété, les électrodes ont été moyennées selon leur région respective pour chaque étape. Les régions regroupées comprennent la région frontale (F3, F4, Fz), centrale (C3, C4, Cz), pariétale (P3, P4, Pz) et occipitale (O1, O2, Oz) (Verbeke, Pozharliev, Van Strien, Belschack & Bagozzi, 2014). Les régions déterminées ont été ensuite comparées avec des tests statistiques.

5.2.3 Tests statistiques utilisés

Les mesures de l'activité « thêta » ont d'abord été soumises à des test-t indépendants. Chaque groupe de participants a été comparé entre eux sur chaque région cérébrale de

chaque étape de l'étude. Ensuite, des test-t pairés de Student ont été effectués afin de comparer les valeurs entre les groupes (utilisateurs de stratégies spatiales vs utilisateurs de stratégie réponse) et entre les conditions expérimentales (phases A,B,C,D,E,F,G,H) pour les ondes « thêta » et « gamma ». Ces tests incluaient des comparaisons intragroupes et intergroupes entre les phases A et G (premier état de repos et état de repos final). Ce fut également le cas pour les phases de repos A et C (ce dernier étant le second état de repos), C et E (ce dernier étant le troisième état de repos) ainsi que E et G. Le niveau contrôle (H) a également été comparé à une moyenne du mean power des trois niveaux effectués par les sujets (étapes B, D et F). Les sujets ont également été testés sur une ANOVA à un facteur pour chaque région cérébrale de chaque étape, le facteur étant la stratégie d'apprentissage du participant. Des ANOVA à mesures répétées ont également été produites concernant la relation condition/région cérébrale/stratégie de navigation entre le niveau contrôle (H) et la moyenne des trois niveaux de la phase test (3L).

6. Résultats

6.1 ANOVA à mesures répétées

Les tests multivariés des ANOVA à mesures répétées effectuée entre la condition contrôle H (région frontale, centrale, pariétale et occipitale) et active 3L (région frontale, centrale, pariétale et occipitale) démontrent une interaction significative entre la condition, la région cérébrale ainsi que de la stratégie de navigation du participant.

Cette relation ($F=3,958$) est significative au niveau de la correction de huynh-feldt ($p=0.022$), mais pas en ce qui concerne la borne inférieure ($p=0.055$). Cette relation est aussi présente pour la condition expérimentale et la région cérébrale ($F=7.327$, $p=0.001$). Le test des effets intrasujets démontre une interaction significative à la fois entre la condition et la région cérébrale ($F=5,971$) significative au niveau de la borne inférieure ($p=0.02$). Il ne semble pas y avoir d'interaction entre la condition et la stratégie de navigation ($F=0.431$) en ce qui concerne la borne inférieure ($p=0.516$).

Aucune interaction significative n'a également été trouvée simplement entre la stratégie de navigation et la région cérébrale étudiée ($F=1,743$) au niveau de la borne inférieure ($p=0.195$). Lors des tests des contrastes intrasujets, une relation significative a été découverte en les effets linéaires de la condition et des effets cubiques ($F=8,210$; $p=0.007$) mais pas au niveau linéaire ($F=1,469$; $p=0.234$) de la région cérébrale. Une interaction significative est également présente dans la relation condition / région / stratégie au niveau des effets linéaires de la condition et des effets linéaires ($F=6,129$; $p=0.018$) mais pas au niveau des effets cubiques ($F=0.039$; $p=0.845$) des régions cérébrales lorsqu'elles sont étudiées globalement. Une interaction au niveau occipital s'est avérée significative lors d'une ANOVA à mesure répétée visant spécifiquement les interactions entre chaque région et la stratégie utilisée ($F=4,434$, $p=0.042$). Les autres régions n'ont cependant aucune interaction significative avec la stratégie de navigation utilisée à première vue. Un test-t pour échantillons indépendants a également révélé une différence significative selon la stratégie en ce qui concerne la différence entre la moyenne des niveaux actifs et celle des niveaux passifs (3L-H) au niveau occipital ($t=$

2,106, $p= 0.042$). Les ANOVAs à mesures répétées ne font état d'aucune relation significative entre la première et dernière phase d'état de repos.

6.2 Test-T appariés intragroupes (3L)

6.2.1 Ondes Thêta

Le gain d'activité thêta de chaque groupe obtenu lors de la moyenne des trois niveaux actifs (3L) par rapport au niveau contrôle pour la totalité des sujets, sans tenir compte de leur stratégie de navigation (Figure 6), a été comparé.

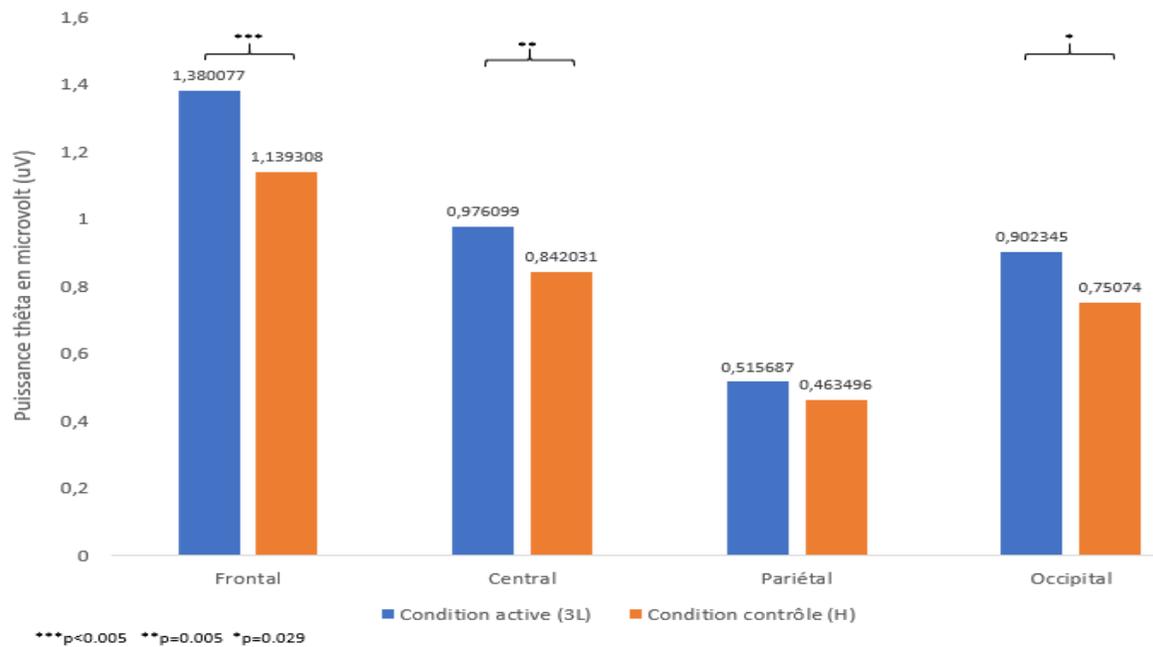


Figure 6 : L'activité thêta mesurée en microvolts (uV) entre la moyenne des trois niveaux actifs (3L) et le niveau contrôle moyennée pour l'ensemble des participants sans attrait pour leur stratégie de navigation spatiale

Dans le cas de test-t appariés, la différence entre la moyenne des trois niveaux actifs et du niveau contrôle est significative au niveau frontal (0.2408 uV; $t=4.071$; $p<0.004$ après correction de Bonferroni), central (0.1341 uV; $t=3.008$; $p=0.04$ après correction de Bonferroni) et occipital (0.1516 uV; $t=2.266$; $p=0.029$). La région pariétale n'a pas donné de résultats significatifs. Lorsque la moyenne des trois niveaux de jeu actif (3L) avec le niveau contrôle (H) est comparée dans un test-t apparié pour les différences intragroupe (Figure 7), il y a une différence de puissance moyenne chez les participants spatiaux qui est significative au niveau frontal (0.1891 uV; $t=-2.883$; $p=0.01$), central (0.1714 uV; $t=-4.790$; $p<0.004$ après correction de Bonferroni), pariétal (0.1124 uV; $t=-2.133$; $p=0.048$) et occipital (0.2973 uV; $t=-4.719$; $p<0.004$ après correction de Bonferroni).

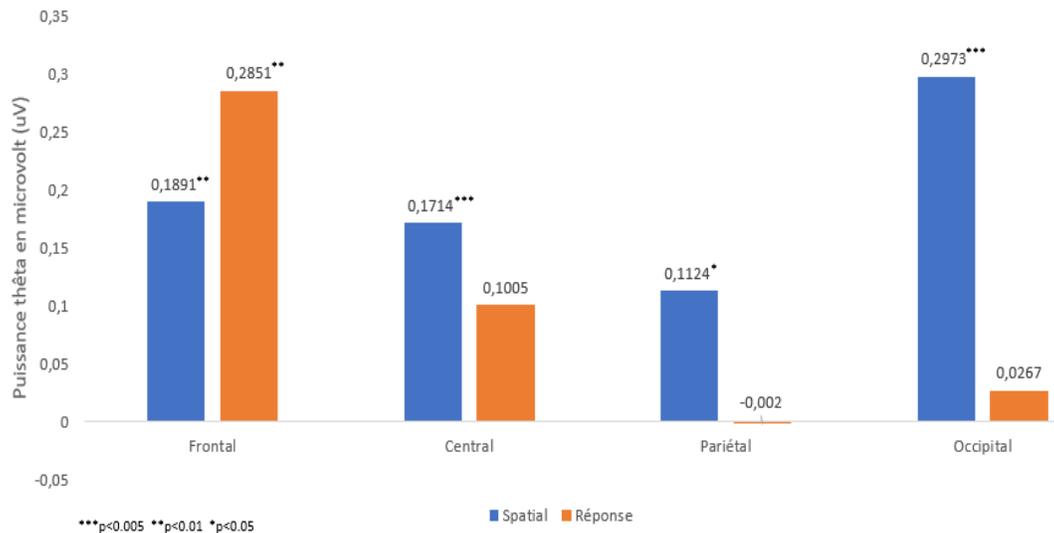


Figure 7 : Les différences d'activité cérébrale thêta entre les niveaux actifs (3L) et le niveau contrôle (H) pour chaque groupe. Les différences sont comparées de façon intragroupe.

En ce qui concerne les participants utilisant une stratégie réponse, les analyses ne démontrent aucune différence significative entre la moyenne des trois niveaux actifs et le niveau contrôle sauf au niveau frontal (0.285 uV; $t = -3.005$; $p = 0.007$). Les différences intragroupes au niveau central (0.1005 uV; $t = -1.277$; $p = 0.217$), pariétal (-0.002 uV; $t = 0.035$; $p = 0.972$) et occipital (0.0267 uV; $t = -0.252$; $p = 0.803$) ne sont pas significatives.

6.2.2 Ondes Gamma

Des test-t ont également été effectués sur la différence entre l'activité gamma des trois niveaux actifs et du niveau contrôle de façon intragroupe. La différence d'activité est significative au niveau central (0.2231 uV; $t = 2,277$; $p = 0,037$) et occipital (0.0423 uV; $t = 2,993$; $p = 0,008$) pour les apprenants spatiaux mais aucune différence n'a été démontrée au niveau frontal ou pariétal. Concernant les apprenants réponses, une différence quasi significative a été démontrée au niveau frontal (0.0405 uV; $t = 2,013$; $p = 0,058$) mais n'a pu être démontrée dans aucune des autres régions.

6.3 Test-T indépendants et appariés (niveaux B-D-F)

En ce qui concerne les test-t indépendants (par rapport à la stratégie de navigation employée) effectués pour les ondes cérébrales de type thêta pour chaque niveau, une différence significative entre les participants est présente lors du niveau 2 (phase D) en frontal (Les participants réponses montrent une activité thêta qui est supérieure aux

participants spatiaux par 0.3860 uV), tant au niveau de l'hypothèse des variances égales ($t=-2.045$, $p=0.048$) que inégales ($t=-2.101$, $p=0.043$). Le test de Lavene sur l'égalité des variances est toutefois non-significatif ($F=2.305$, $p=0.137$). Des investigations plus approfondies sur la différence intergroupe présente lors du niveau actif 2 (phase D) comparé avec le niveau contrôle (phase H) de la région frontale sous la forme de test appariés confirment une différence significative entre la condition contrôle et active de ce niveau spécifiquement ($t=3.623$, $p=0.008$ après correction de Bonferroni). Des test-t intragroupes démontrent également chez les participants spatiaux une différence d'activité thêta significative lorsque comparés au niveau 2 (Phase D) par rapport au niveau contrôle (Phase H) en frontal (0.1810 uV; $t=2.716$; $p=0.015$), mais démontre également des résultats significatifs au niveau central (0.1758 uV; $t=3.615$; $p=0.016$ après correction de Bonferroni) et au niveau occipital (0.4040 uV; $t=3.671$; $p=0.016$ après correction de Bonferroni). Le niveau 1 (Phase B) amène également son lot de différence d'activité thêta significative lorsqu'il est comparé avec la phase contrôle chez les participants spatiaux au niveau central (0.1577 uV; $t=4.437$; $p<0.004$ après correction de Bonferroni) et occipital (0.2523 uV; $t=3.437$; $p=0.024$ après correction de Bonferroni). En ce qui concerne le niveau 3 (Phase F), les différences d'activité thêta avec le niveau contrôle sont significatives chez les participants spatiaux dans la région centrale (0.1869 uV; $t=2.770$; $p=0.013$) et occipitale (0.2962 uV; $t=2.636$; $p=0.017$). En s'intéressant de plus près aux niveaux actifs (B,D,F) individuellement et à la différence d'activité cérébrale obtenue avec le niveau contrôle (H) chez les participants réponses, il est possible d'observer que seules les régions frontales donnent un résultat significatif,

peu importe quel niveau est comparé de façon individuelle avec le niveau contrôle (B=0.2798 uV; t=2.406; p=0.026, D=0.3191 uV; t=2.710; p=0.013, F=0.2019 uV; t=2.231; p=0.038).

L'étape contrôle (Phase H) obtient également un résultat significatif en occipital (différence de 0.2896 uV, en faveur des apprenants réponses), tant au niveau de l'hypothèse des variances égales (t=-2.125, p=0.040) que inégales (t=-2.238, p=0.033), mais n'est pas significatif en ce qui concerne le test de Lavene sur l'égalité des variances (F=3.583, p=0.066). Les test-t indépendants effectués sur les autres régions et les autres étapes du test n'ont offert aucune donnée significative.

7. Discussion

Ce mémoire s'intéresse à déterminer si la navigation spatiale dans un milieu virtuel à l'aide d'un jeu vidéo de type plateforme permet d'augmenter l'activité cérébrale, en particulier les ondes thêta, de façon significative. Elle visait également à identifier si l'activité thêta des apprenants spatiaux allait être significativement plus élevée que celle des apprenants réponses.

La première conclusion importante de cette étude réside dans le fait que, conformément aux hypothèses établies, jouer aux jeux vidéo de type plateforme tel que « Super Mario 64 » augmente le niveau d'ondes cérébrales de type « thêta » chez un sujet lorsque la puissance thêta moyenne des trois niveaux actifs est comparée à celle

du niveau contrôle. La principale explication à ce sujet réside dans le fait que les jeux de plateformes sont connus dans la littérature pour provoquer une activité hippocampique notable chez le sujet (West & al., 2017). Conformément à la seconde hypothèse, cela s'est avéré encore plus probable chez les participants utilisant une stratégie de type spatiale que les participants utilisant une stratégie de type réponse. Les utilisateurs de stratégies spatiales font régulièrement appel à leur hippocampe pour s'orienter, alors que les utilisateurs de stratégies réponses utilisent davantage les noyaux caudés (O'keefe et Nadel, 1978; Berthoz, 2001; Iaria, Petrides, Dagher, Pike & Bohbot, 2003; West et al., 2015; West et al., 2017). Toujours en accord avec la seconde hypothèse, il y a une augmentation significative de la puissance au niveau de la bande de fréquence thêta chez les apprenants spatiaux (dans les régions frontales, centrales, pariétales et occipitales), mais beaucoup moins importante chez les apprenants réponses (augmentation significative en région frontale seulement) lorsque la moyenne des ondes thêta lors des trois niveaux actifs est comparée à celle du niveau contrôle. Cette conclusion permet de supposer qu'il y a bel et bien un effet significatif de la sollicitation des capacités de navigation chez les participants spatiaux sans doute, mais également possiblement des participants réponses, chez qui une activité des noyaux caudés et du striatum serait possiblement observable en accord avec la littérature. Il faut néanmoins souligner que la puissance brute des ondes thêta est généralement supérieure chez les apprenants réponses par rapport aux apprenants spatiaux, contrairement à ce qui est classiquement obtenu dans la littérature. Les tests effectués spécifiquement sur la région frontale en comparant le niveau 2 et le niveau contrôle tendent à confirmer ce

résultat peu orthodoxe. Cela s'exprime non seulement lorsque chaque groupe est significativement affecté par la sollicitation des capacités de navigation spatiale (puisque chaque groupe obtient une différence significative entre les deux phases en comparaison intrasujet) mais également que les apprenants réponses ont un niveau plus élevé d'activité thêta que les participants spatiaux (puisque'il y a différence significative entre les deux groupes par test-t indépendants). Néanmoins, ce type d'effet semble jusqu'à présent très peu documenté dans la littérature, puisqu'aucune étude ne s'intéresse à la fois aux jeux de plateforme, à l'activité hippocampique et aux stratégies de navigation à notre connaissance actuelle.

Toutefois, tel que souligné précédemment, la différence intragroupe entre la condition active et la condition contrôle lorsque les niveaux actifs sont moyennés n'est que significative dans la région frontale seulement chez les apprenants réponses. La région frontale est d'ailleurs la seule région où la différence d'activité entre les niveaux actifs et le niveau contrôle des apprenants réponses est significative et supérieure à celle des apprenants spatiaux. Une première explication évoque la possibilité que les apprenants réponses, en tant qu'individus, aient eu besoin de davantage de concentration pour accomplir leur tâche, ce qui tend à provoquer l'apparition d'activité thêta (Sasaki, Tsujimoto, Nishikawa, Nishitani & Ishihara, 1996; Araùjo, Baffa & Wakai, 2002).

La seconde explication stipulerait la possibilité qu'une importante stimulation visuelle soutenue qu'est la tâche puisse être impliquée de manière au moins partielle dans ces résultats, une fois encore d'un point de vue individuel (Araùjo, Baffa & Wakai, 2002).

Une troisième explication possible serait que la durée prolongée du test (soit des sessions de quinze minutes par niveau) ait un effet particulier sur les apprenants réponses par rapport aux apprenants spatiaux, plus précisément sur la région frontale. Selon les recherches réalisées par Kahana et ses collègues (1999) à l'aide d'iEEG, le taux relatif d'épisode thêta augmente lorsque les épreuves de navigation sont plus longues comparativement aux épreuves plus courtes (douze embranchements d'un labyrinthe à jonctions T, comparativement à six embranchements). Reproduire le protocole de l'étude de Kahana en distinguant les apprenants spatiaux et réponses permettrait de clarifier davantage cette hypothèse.

Une quatrième explication postulerait qu'une ou plusieurs fonctions cognitives peuvent être à l'origine de cette différence significative. Selon Reiner et ses collègues (2014), l'activité thêta serait liée à l'apprentissage et également à d'autres fonctions mnésiques comme la consolidation dans la région du cortex préfrontal médian ainsi que dans le système hippocampique (Anderson, Rajagovidan, Ghacibeh, Meador & Ding, 2009; Benchenane et al., 2010; Steinvorth, Wang, Ulbert, Schomer et Halgren, 2010), la mémoire de travail et l'attention soutenue (Mitchel,, McNaughton, Flanagan et Kirk, 2008). Selon ce qui est établi dans la littérature, le centre de l'hippocampe échange des informations avec des structures néocorticales telles que l'amygdale ou le striatum (Battaglia, Benchenane, Sirota, Pennartz et Wiener, 2011; Albouy, 2008). Les échanges entre le striatum et l'hippocampe sont régulés par les ondes cérébrales thêta (Mizuseki, Sirota, Pastalkova, Buzsáki, 2009; Klausberger et al, 2003). Le striatum est d'ailleurs connu pour être une structure particulièrement active chez les apprenants réponses

(O'keefe et Nadel, 1978; Berthoz, 2001; Iaria, Petrides, Dagher, Pike & Bohbot, 2003; West et al., 2015; West et al., 2017). L'un des symptômes de ces échanges s'avère être une activité thêta significative dans la région frontale médiane (Reiner, Rozengurt & Barnea, 2014). Il est possible que la théorie des échanges entre les structures et ce des fonctions cognitives soient reliées (Caplan & al., 2003). Il est donc probable que l'importance de l'activité thêta significative présente en région frontale chez les apprenants réponses soit justifiée par les échanges entre ces structures cérébrales. Cette explication est d'ailleurs soutenue par le fait qu'une activité gamma quasi significative ($p=0,058$, en référence au point 6.2.2) ait été démontrée chez les apprenants réponses dans la région frontale, alors qu'une activité gamma significative n'a pu être démontrée chez les apprenants spatiaux dans cette région. Il est connu dans la littérature que l'activité gamma peut être reliée à l'attention sélective (Tiitinen et al., 1993; Shibata et al., 1999; Strüber, Basar-Eroglu, Hoff et Stadler, 2000), l'attention soutenue (Tiitinen, Sinkkonen, May et Näätänen, 1994; Strüber, Basar-Eroglu, Hoff et Stadler, 2000) et à l'apprentissage associatif (Miltner, Braun, Arnold, Witte, Taub, 1999). Considérant ces faits, et que le lobe frontal joue un rôle important dans les processus attentionnels (Fuster, 1989), on peut penser que l'activité gamma (qui est significative chez les apprenants réponses et n'a pu être démontré significative chez les apprenants spatiaux) générée par les processus attentionnels peut expliquer, du moins en partie, les différences d'activité cérébrale au niveau frontal entre les deux types d'apprenants. Il serait même intéressant de suggérer la possibilité que les ondes gamma jouent un rôle

plus prépondérant pendant la navigation chez les apprenants réponses comparativement aux apprenants spatiaux.

Dans une autre perspective concernant les fonctions cognitives, Lin et ses collègues (2015) soutiennent que cela peut être dû aux relations que chaque type d'apprenant entretient avec l'environnement et les points de repère. Par exemple, un apprenant réponse doit cognitivement mettre à jour à la fois sa position, mais également son orientation à chacun de ses déplacements (qui peuvent inclure translations et rotations) puisque son point de référence est sa propre personne par rapport aux points de repère dans son environnement. Or, puisqu'un apprenant spatial n'utilise que les relations entre les points de repère pour naviguer, l'apprenant spatial ne doit que mettre à jour sa position, mais pas son orientation (Klatzky, Freska, Habel & Wender, 1998). Ces faits amènent à penser que la mémoire de travail est davantage sollicitée chez les apprenants réponses comparativement aux apprenants spatiaux (Lin, Chui, Gramann, 2015; Spiers, 2008). Or, tel que mentionné dans l'explication précédente, la mémoire de travail est liée à une activité thêta notable.

La découverte d'un lien significatif entre l'activité thêta dans région occipitale avec la stratégie employée par le participant coïncide avec les rapports de Berthoz (2001) lors de deux tâches. Lors de la première tâche, le participant devait explorer un trajet inconnu dans une ville virtuelle à l'aide de divers points de repère et par la suite, effectuer une locomotion mentale au long de ce trajet. Lors de la seconde tâche, le sujet devait visualiser une carte comprenant sept points de couleurs différentes.

L'expérimentateur demandait au participant d'imaginer un point laser se déplacer entre

deux points spécifiques. Le mouvement des yeux était également enregistré durant le test. L'imagerie TEP révèle qu'il y avait bien une activation des régions occipito-temporales médianes durant la tâche de navigation (avec une sollicitation des capacités similaire aux tâches employées dans la présente étude), mais non durant la tâche d'exploration mentale. Ce type de résultat démontre que bien qu'anodine, la présence d'activité cérébrale de type thêta en région occipitale n'est pas improbable. L'obtention d'une différence significative (après correction de Bonferroni) entre l'activité cérébrale présente lors des niveaux actifs (phase 3L) et du niveau contrôle (phase H) au niveau occipital semble corroborer l'importance que cette région a dans la navigation spatiale chez les sujets utilisant une stratégie allocentrique. Répliquer la première expérience de Berthoz (2001) en divisant les participants en deux groupes expérimentaux selon leur stratégie de navigation et en analysant l'activité cérébrale présente en région occipitale par EEG avec localisation de source permettrait d'explorer davantage cette hypothèse.

7.1 Recommandations futures

Cette étude visait initialement à comparer l'activité cérébrale obtenue entre le premier et le dernier état de repos, mais aucun effet significatif n'a pu être observé entre ces deux phases de test. Il serait intéressant de reproduire les paramètres de l'étude (groupes expérimentaux triés par stratégie de navigation, tester les participants sur le jeu Super Mario 64), possiblement avec le même temps de jeu actif (soit quarante-cinq minutes) ou davantage de temps de jeu afin d'observer si un changement d'activité

significatif est perceptible. Un nombre plus élevé de participants pourraient également fournir davantage de puissance statistique et permettrait possiblement la découverte de nouveaux résultats significatifs.

Il incombe également de souligner que cette étude a recours à des informations indirectes concernant les structures anatomiques via l'activité cérébrale mesurée par EEG. Un justificatif important de cette étude consiste à démontrer qu'une activité cérébrale thêta est perceptible à coûts moindres lorsque comparé à des méthodes plus dispendieuses (tel que l'imagerie par résonance magnétique ou la magnétoencéphalographie, par exemple). Afin d'avoir une image plus précise concernant les structures neuroanatomiques qui émettent les activités observées, il serait intéressant de développer un protocole de localisation de source à l'aide d'une IRMf, mais possiblement aussi à l'aide de la MEG qui reprendrait les procédures expérimentales utilisées dans la présente étude. Bien que plus onéreuse, cette méthode permettrait d'effectuer une localisation de source précise qui permettra de relier de façon plus certaine la variation des ondes cérébrales thêta à l'hippocampe, qui s'avère être une structure particulièrement enfouie profondément dans le cerveau humain ainsi que de confirmer les résultats obtenus dans la présente étude.

Alternativement, une autre façon d'opérer la localisation de source serait via la numérisation des électrodes. Ce procédé peut être opéré à l'aide d'un assemblage de caméras disposées autour du casque EEG lorsque celui-ci est porté par le participant. Il est également possible d'opérer une prise de photo en mode panoramique à l'aide d'un téléphone intelligent afin d'obtenir sensiblement le même résultat. Via la numérisation,

il est possible de mettre en place des « dipôles » qui permettront d'associer la variation des ondes cérébrales à un endroit précis dans les couches sous-corticales du cerveau. Cette méthode pourrait être implémentée afin d'augmenter la validité scientifique du protocole tout en gardant une méthode d'imagerie davantage accessible que l'IRMf.

7.2 Perspectives

En accord avec nos résultats et en continuité avec la littérature scientifique, cette étude a démontré un effet significatif des jeux de plateforme sur l'activité thêta. Puisque l'on sait que l'activité thêta est corrélée avec une augmentation du volume hippocampique et que les jeux vidéo de plateforme ont une influence positive sur le volume hippocampique, il serait intéressant de pousser davantage les résultats de cette étude. Il serait possible de créer ainsi un entraînement de soutien basé sur des jeux de plateforme tel que « Super Mario 64 » afin d'augmenter le volume hippocampique chez des patients souffrant ou étant à risque de développer des troubles cognitifs dégénératifs graves comme la maladie d'Alzheimer. En effet, de telles mesures pourraient agir comme traitement de soutien et pourraient aider à pallier et renforcer l'effet des traitements existants, les jeux de plateforme ayant l'avantage d'être une source de divertissement commerciale étant accessible à tous. Il serait également intéressant de développer des études afin de tester certains successeurs modernes de « Super Mario 64 », tel que « Super Mario Odyssey » et de vérifier leur influence sur le volume hippocampique.

8. Références

- Abrahams, S., Pickering, A., Polkey, C. E., & Morris, R. G. (1997). Spatial memory deficits in patients with unilateral damage to the right hippocampal formation. *Neuropsychologia*, 35(1), 11-24. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(96\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(96)00051-6)
- Albouy, G., Sterpenich, V., Balteau, E., Vandewalle, G., Desseilles, M., Dang-Vu, T., ... Maquet, P. (2008). Both the Hippocampus and Striatum Are Involved in Consolidation of Motor Sequence Memory. *Neuron*, 58(2), 261-272. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.02.008>
- Anderson, K. L., Rajagovindan, R., Ghacibeh, G. A., Meador, K. J., & Ding, M. (2010). Theta Oscillations Mediate Interaction between Prefrontal Cortex and Medial Temporal Lobe in Human Memory. *Cerebral Cortex*, 20(7), 1604-1612. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp223>
- Araújo, D. B. de, Baffa, O., & Wakai, R. T. (2002). Theta Oscillations and Human Navigation: A Magnetoencephalography Study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(1), 70-78. <https://doi.org/10.1162/089892902317205339>
- Battaglia, F. P., Benchenane, K., Sirota, A., Pennartz, C. M. A., & Wiener, S. I. (2011). The hippocampus: hub of brain network communication for memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(7), 310-318. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.05.008>
- Benchenane, K., Peyrache, A., Khamassi, M., Tierney, P. L., Gioanni, Y., Battaglia, F. P., & Wiener, S. I. (2010). Coherent Theta Oscillations and Reorganization of Spike Timing in the Hippocampal- Prefrontal Network upon Learning. *Neuron*, 66(6), 921-936. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.05.013>

- Berthoz, A. (2001). Neural basis of spatial orientation and memory of routes: topokinetic memory or topokinesesthetic memory. *Revue neurologique*, 157(8-9 Pt 1), 779-789.
- Bischof, W. F., & Boulanger, P. (2003). Spatial Navigation in Virtual Reality Environments: An EEG Analysis. *CyberPsychology & Behavior*, 6(5), 487-495.
<https://doi.org/10.1089/109493103769710514>
- Bohbot, V. D., Lerch, J., Thorndyraft, B., Iaria, G., & Zijdenbos, A. P. (2007). Gray matter differences correlate with spontaneous strategies in a human virtual navigation task. *Journal of Neuroscience*, 27(38), 10078-10083.
- Bohbot, Véronique D., Iaria, G., & Petrides, M. (2004). Hippocampal Function and Spatial Memory: Evidence From Functional Neuroimaging in Healthy Participants and Performance of Patients With Medial Temporal Lobe Resections. *Neuropsychology*, 18(3), 418-425. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.18.3.418>
- Bohbot, Veronique D, Kalina, M., Stepankova, K., Spackova, N., Petrides, M., & Nadel, L. (1998). Spatial memory deficits in patients with lesions to the right hippocampus and to the right parahippocampal cortex. *Neuropsychologia*, 36(11), 1217-1238.
[https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(97\)00161-9](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(97)00161-9)
- Bohbot, Veronique D., McKenzie, S., Konishi, K., Fouquet, C., Kurdi, V., Schachar, R., ... Robaey, P. (2012). Virtual navigation strategies from childhood to senescence: evidence for changes across the life span. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 4.
<https://doi.org/10.3389/fnagi.2012.00028>
- Bohbot, Veronique Deborah. (2014). *US20140315169A1*. United States. Consulté à l'adresse <https://patents.google.com/patent/US20140315169A1/en>

- Buzsáki, G., & Moser, E. I. (2013). Memory, navigation and theta rhythm in the hippocampal-entorhinal system. *Nature Neuroscience*, *16*(2), 130-138. <https://doi.org/10.1038/nn.3304>
- Caplan, J. B., Madsen, J. R., Schulze-Bonhage, A., Aschenbrenner-Scheibe, R., Newman, E. L., & Kahana, M. J. (2003). Human θ Oscillations Related to Sensorimotor Integration and Spatial Learning. *Journal of Neuroscience*, *23*(11), 4726-4736. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-11-04726.2003>
- Cornwell, B. R., Johnson, L. L., Holroyd, T., Carver, F. W., & Grillon, C. (2008). Human Hippocampal and Parahippocampal Theta during Goal-Directed Spatial Navigation Predicts Performance on a Virtual Morris Water Maze. *Journal of Neuroscience*, *28*(23), 5983-5990. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5001-07.2008>
- Dahmani, L., & Bohbot, V. D. (2015). Dissociable contributions of the prefrontal cortex to hippocampus- and caudate nucleus-dependent virtual navigation strategies. *Neurobiology of Learning and Memory*, *117*, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2014.07.002>
- Dahmani, L., Ledoux, A.-A., Boyer, P., & Bohbot, V. D. (2012). Wayfinding: The effects of large displays and 3-D perception. *Behavior Research Methods*, *44*(2), 447-454. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0158-9>
- Etchamendy, N., & Bohbot, V. D. (2007). Spontaneous navigational strategies and performance in the virtual town. *Hippocampus*, *17*(8), 595-599. <https://doi.org/10.1002/hipo.20303>
- Etchamendy, N., Konishi, K., Pike, G. B., Marighetto, A., & Bohbot, V. D. (2012). Evidence for a virtual human analog of a rodent relational memory task: A study of aging and fMRI in young adults. *Hippocampus*, *22*(4), 869-880. <https://doi.org/10.1002/hipo.20948>

- Falk, T. H., Banville, H. J., Bishundayal, S., Cassini, R., Clerico, A., Dahmani, L., ... Bohbot, V. D. (2014). *EEG Theta modulation is greater in spatial learners than response learners: a scalp EEG study in young adults tested on a virtual navigation task*. Présenté à Society for Neuroscience, Washington, United States. Consulté à l'adresse <https://drive.google.com/file/d/0B0aP5U9yZQkINm1WdV9peW95eIU/view>
- Feigenbaum, J. D., Polkey, C. E., & Morris, R. G. (1996). Deficits in spatial working memory after unilateral temporal lobectomy in man. *Neuropsychologia*, 34(3), 163-176.
- Fuster, J. (1989). *The Prefrontal Cortex: Anatomy, Physiology and Neuropsychology of the Frontal Lobe*. (2nd éd.). New York: Raven Press.
- Gillner, S., & Mallot, H. A. (1998). Navigation and Acquisition of Spatial Knowledge in a Virtual Maze. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10(4), 445-463. <https://doi.org/10.1162/089892998562861>
- Goldstein, L. H., Canavan, A. G. M., & Polkey, C. E. (1989). Cognitive mapping after unilateral temporal lobectomy. *Neuropsychologia*, 27(2), 167-177. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(89\)90169-3](https://doi.org/10.1016/0028-3932(89)90169-3)
- Gramann, K., Onton, J., Riccobon, D., Mueller, H. J., Bardins, S., & Makeig, S. (2010). Human Brain Dynamics Accompanying Use of Egocentric and Allocentric Reference Frames during Navigation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(12), 2836-2849. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21369>
- Grastyán, E., Lissák, K., Madarász, I., & Donhoffer, H. (1959). Hippocampal electrical activity during the development of conditioned reflexes. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 11(3), 409-430. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(59\)90040-](https://doi.org/10.1016/0013-4694(59)90040-9)

- Green, J.D., Maxwell, D. S., & Petsche, H. (1961). Hippocampal electrical activity III. Unitary events and genesis of slow waves. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 13(6), 854-867.
- Green, J.D., Maxwell, D. S., Schindler, W. J., & Stumpf, C. (1960). Rabbit EEG 'Theta' rhythm: its anatomical source and relation to activity in single neurons. *Journal of Neurophysiology*, 23(4), 403-420.
- Green, J.D., & Petsche, H. (1961). Hippocampal electrical activity II. Virtual generators. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 13(6), 847-853.
- Green, John D., & Arduini, A. A. (1954). Hippocampal electrical activity in arousal. *Journal of Neurophysiology*, 17(6), 533-557. <https://doi.org/10.1152/jn.1954.17.6.533>
- Gruzelier, J. (2009). A theory of alpha/theta neurofeedback, creative performance enhancement, long distance functional connectivity and psychological integration. *Cognitive Processing*, 10(1), 101-109. <https://doi.org/10.1007/s10339-008-0248-5>
- Hartley, T., Maguire, E. A., Spiers, H. J., & Burgess, N. (s. d.). The Well-Worn Route and the Path Less Traveled: Distinct Neural Bases of Route Following and Wayfinding in Humans, 12.
- Holdstock, J. S., Mayes, A. R., Cezayirli, E., Isaac, C. L., Aggleton, J. P., & Roberts, N. (2000). A comparison of egocentric and allocentric spatial memory in a patient with selective hippocampal damage. *Neuropsychologia*, 38(4), 410-425. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(99\)00099-8](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(99)00099-8)
- Iaria, G., Petrides, M., Dagher, A., Pike, B., & Bohbot, V. D. (2003). Cognitive strategies dependant on the hippocampus and caudate nucleus in human navigation: variability and change with practice. *Journal of Neuroscience*, 23(13), 5945-5952.

- Kahana, M. J., Sekuler, R., Caplan, J. B., Kirschen, M., & Madsen, J. R. (1999). Human theta oscillations exhibit task dependence during virtual maze navigation. *Nature*, *399*(6738), 781-784. <https://doi.org/10.1038/21645>
- Klatzky, R. L. (1998). Allocentric and Egocentric Spatial Representations: Definitions, Distinctions, and Interconnections. Dans C. Freksa, C. Habel, & K. F. Wender (Éd.), *Spatial Cognition: An Interdisciplinary Approach to Representing and Processing Spatial Knowledge* (p. 1-17). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-69342-4_1
- Klausberger, T., Magill, P. J., Márton, L. F., Roberts, J. D. B., Cobden, P. M., Buzsáki, G., & Somogyi, P. (2003). Brain-state- and cell-type-specific firing of hippocampal interneurons *in vivo*. *Nature*, *421*(6925), 844-848. <https://doi.org/10.1038/nature01374>
- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Russergger, H., & Pachinger, T. (1996). Theta band power in the human scalp EEG and the encoding of new information. *NeuroReport*, *7*(7), 1235-1240.
- Konishi, K., Etchamendy, N., Roy, S., Marighetto, A., Rajah, N., & Bohbot, V. D. (2013). Decreased functional magnetic resonance imaging activity in the hippocampus in favor of the caudate nucleus in older adults tested in a virtual navigation task. *Hippocampus*, *23*(11), 1005-1014. <https://doi.org/10.1002/hipo.22181>
- Kühn, S., & Gallinat, J. (2014). Amount of lifetime video gaming is positively associated with entorhinal, hippocampal and occipital volume. *Molecular Psychiatry*, *19*(7), 842-847. <https://doi.org/10.1038/mp.2013.100>
- Kühn, S., Gleich, T., Lorenz, R. C., Lindenberger, U., & Gallinat, J. (2014). Playing Super Mario induces structural brain plasticity: gray matter changes resulting from training with

a commercial video game. *Molecular Psychiatry*, 19(2), 265-271.

<https://doi.org/10.1038/mp.2013.120>

Lerch, J. P., Yiu, A. P., Martinez-Canabal, A., Pekar, T., Bohbot, V. D., Frankland, P. W., ...

Sled, J. G. (2011). Maze training in mice induces MRI-detectable brain shape changes specific to the type of learning. *NeuroImage*, 54(3), 2086-2095.

<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.09.086>

Lin, C.-T., Chiu, T.-C., & Gramann, K. (2015). EEG correlates of spatial orientation in the human retrosplenial complex. *NeuroImage*, 120, 123-132.

<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.07.009>

Luck, S. (2005). *An Introduction to the Event-Related Potential Technique* (The MIT Press). Cambridge.

Maguire, E. A., Burke, T., Phillips, J., & Staunton, H. (1996). Topographical disorientation following unilateral temporal lobe lesions in humans. *Neuropsychologia*, 34(10),

993-1001. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(96\)00022-X](https://doi.org/10.1016/0028-3932(96)00022-X)

Miltner, W. H. R., Braun, C., Arnold, M., Witte, H., & Taub, E. (1999). Coherence of gamma-band EEG activity as a basis for associative learning. *Nature*, 397(6718), 434-436.

<https://doi.org/10.1038/17126>

Mitchell, D. J., McNaughton, N., Flanagan, D., & Kirk, I. J. (2008). Frontal-midline theta from the perspective of hippocampal "theta". *Progress in Neurobiology*, 86(3), 156-185.

<https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2008.09.005>

Mizuseki, K., Sirota, A., Pastalkova, E., & Buzsáki, G. (2009). Theta Oscillations Provide Temporal Windows for Local Circuit Computation in the Entorhinal-Hippocampal Loop.

Neuron, 64(2), 267-280. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2009.08.037>

- Moffat, S. D., & Resnick, S. M. (2002). Effects of age on virtual environment place navigation and allocentric cognitive mapping. *Behavioral neuroscience*, 116(5), 851.
- Morris, R. G., Pickering, A., Abrahams, S., & Feigenbaum, J. D. (1996). Space and the hippocampal formation in humans. *Brain Research Bulletin*, 40(5-6), 487-490.
[https://doi.org/10.1016/0361-9230\(96\)00146-3](https://doi.org/10.1016/0361-9230(96)00146-3)
- Murias, K., Kwok, K., Castillejo, A. G., Liu, I., & Iaria, G. (2016). The effects of video game use on performance in a virtual navigation task. *Computers in Human Behavior*, 58, 398-406. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.01.020>
- O'Keefe, J., & Burgess, N. (1999). Theta activity, virtual navigation and the human hippocampus. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(11), 403-406.
[https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(99\)01396-0](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(99)01396-0)
- O'Keefe, J., & Nadel, L. (1978). *The Hippocampus as a Cognitive Map*. Oxford: Clarendon Press. Consulté à l'adresse
<https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/620894/HCMComplete.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Packard, M. G., Hirsh, R., & White, N. M. (s. d.). Differential Effects of Fornix and Caudate Nucleus Lesions on Two Radial Maze Tasks: Evidence for Multiple Memory Systems. *The Journal of Neuroscience*, 8.
- Reiner, M., Lev, D. D., & Rosen, A. (2018). Theta Neurofeedback Effects on Motor Memory Consolidation and Performance Accuracy: An Apparent Paradox? *Neuroscience*, 378, 198-210. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.07.022>

- Reiner, M., Rozengurt, R., & Barnea, A. (2014). Better than sleep: Theta neurofeedback training accelerates memory consolidation. *Biological Psychology*, 95, 45-53.
<https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2013.10.010>
- Rodgers, M. K., Sindone, J. A., & Moffat, S. D. (2012). Effects of age on navigation strategy. *Neurobiology of Aging*, 33(1), 202.e15-202.e22.
<https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2010.07.021>
- Sasaki, K., Tsujimoto, T., Nishikawa, S., Nishitani, N., & Ishihara, T. (1996). Frontal mental theta wave recorded simultaneously with magnetoencephalography and electroencephalography. *Neuroscience Research*, 26(1), 79-81.
[https://doi.org/10.1016/0168-0102\(96\)01082-6](https://doi.org/10.1016/0168-0102(96)01082-6)
- Shibata, T., Shimoyama, I., Ito, T., Abia, D., Iwasa, H., Koseki, K., ... Nakajima, Y. (1999). Attention changes the peak latency of the visual gamma-band oscillation of the EEG: *NeuroReport*, 10(6), 1167-1170. <https://doi.org/10.1097/00001756-199904260-00002>
- Skelton, R. W., Ross, S. P., Nerad, L., & Livingstone, S. A. (2006). Human spatial navigation deficits after traumatic brain injury shown in the arena maze, a virtual Morris water maze. *Brain Injury*, 20(2), 189-203. <https://doi.org/10.1080/02699050500456410>
- Sodums, D. J. (2016). *Virtual Spatial Memory Improvement Program: Impact on cognitive function and grey matter* (Mémoire). McGill University, Montreal, Canada. Consulté à l'adresse
http://digitool.library.mcgill.ca/webclient/StreamGate?folder_id=0&dvs=1533764621711
- [~145](#)

Spiers, H. J. (2008). Keeping the goal in mind: Prefrontal contributions to spatial navigation. *Neuropsychologia*, 46(7), 2106-2108.

<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.01.028>

Steinvorth, S., Wang, C., Ulbert, I., Schomer, D., & Halgren, E. (2010). Human entorhinal gamma and theta oscillations selective for remote autobiographical memory.

Hippocampus, 20(1), 166-173. <https://doi.org/10.1002/hipo.20597>

Strüber, D., Basar-Eroglu, C., Hoff, E., & Stadler, M. (2000). Reversal-rate dependent differences in the EEG gamma-band during multistable visual perception. *International Journal of Psychophysiology*, 38(3), 243-252. [https://doi.org/10.1016/S0167-](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(00)00168-9)

[8760\(00\)00168-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(00)00168-9)

Taube, J. S., & Muller, R. U. (1998). Comparisons of head direction cell activity in the postsubiculum and anterior thalamus of freely moving rats. *Hippocampus*, 8(2), 87-108.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-1063\(1998\)8:2<87::AID-HIPO1>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-1063(1998)8:2<87::AID-HIPO1>3.0.CO;2-4)

Taube, S. (s. d.). Head Direction Cells Recorded in the Anterior Thalamic Nuclei of Freely Moving Rats, 17.

Tiitinen, H., Sinkkonen, J., May, P., & Näätänen, R. (1994). The auditory transient 40-Hz response is insensitive to changes in stimulus features. *Neuroreport: An International Journal for the Rapid Communication of Research in Neuroscience*, 6(1), 190-192.

Neuroreport: An International Journal for the Rapid Communication of Research in Neuroscience, 6(1), 190-192.

<https://doi.org/10.1097/00001756-199412300-00048>

Tiitinen, H. T., Sinkkonen, J., Reinikainen, K., Alho, K., Lavikainen, J., & Näätänen, R.

(1993). Selective attention enhances the auditory 40-Hz transient response in humans.

Nature, 364(6432), 59-60. <https://doi.org/10.1038/364059a0>

- Vallar, G., Lobel, E., Galati, G., Berthoz, A., Pizzamiglio, L., & Bihan, D. L. (1999). A fronto-parietal system for computing the egocentric spatial frame of reference in humans. *Experimental Brain Research*, 124(3), 281-286. <https://doi.org/10.1007/s002210050624>
- Vanderwolf, C. H. (1969). Hippocampal electrical activity and voluntary movement in the rat. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 26(4), 407-418. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(69\)90092-3](https://doi.org/10.1016/0013-4694(69)90092-3)
- Verbeke, W. J. M. I., Pozharliev, R., Strien, V., W, J., Belschak, F., & Bagozzi, R. P. (2014). “I am resting but rest less well with you.” The moderating effect of anxious attachment style on alpha power during EEG resting state in a social context. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00486>
- West, G. L., Drisdelle, B. L., Konishi, K., Jackson, J., Jolicoeur, P., & Bohbot, V. D. (2015). Habitual action video game playing is associated with caudate nucleus-dependent navigational strategies. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1808), 20142952-20142952. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.2952>
- West, G. L., Konishi, K., Diarra, M., Benady-Chorney, J., Drisdelle, B. L., Dahmani, L., ... Bohbot, V. D. (2017). Impact of video games on plasticity of the hippocampus. *Molecular Psychiatry*. <https://doi.org/10.1038/mp.2017.155>
- White, N. M., & McDonald, R. J. (2002). Multiple Parallel Memory Systems in the Brain of the Rat. *Neurobiology of Learning and Memory*, 77(2), 125-184. <https://doi.org/10.1006/nlme.2001.4008>
- Willis, W. G., & Weiler, M. D. (2005). Neural Substrates of Childhood Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder: Electroencephalographic and Magnetic Resonance

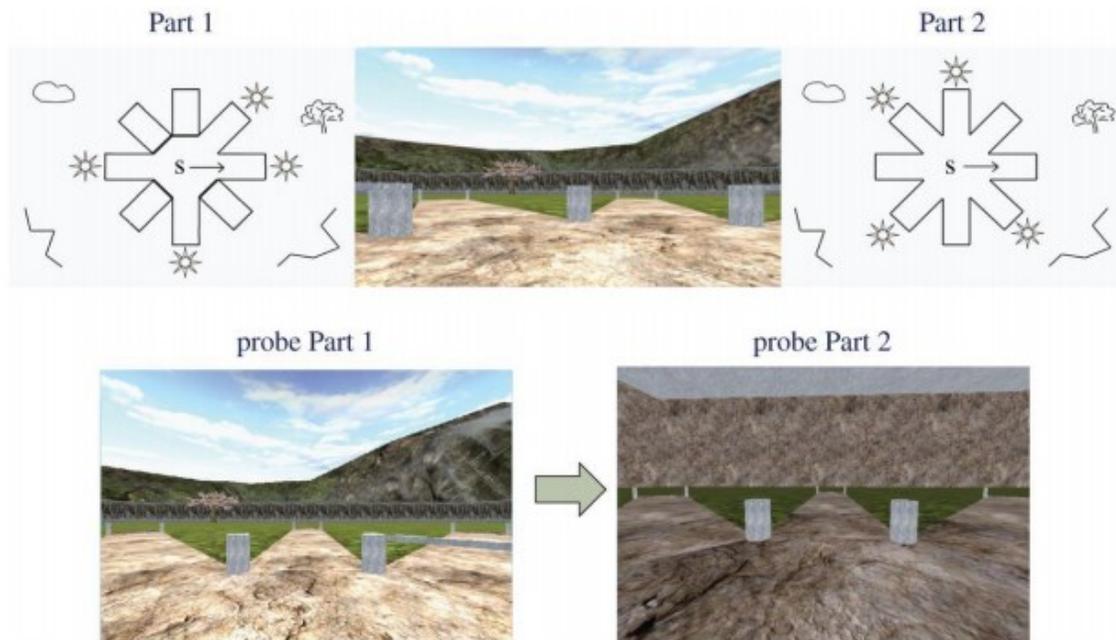
Imaging Evidence. *Developmental Neuropsychology*, 27(1), 135-182.

https://doi.org/10.1207/s15326942dn2701_6

Winson, J. (1978). Loss of Hippocampal Theta Rhythm Results in Spatial Memory Deficit in the Rat. *Science*, 201(4351), 160-163.

9. Annexes

9.1 Comparaison entre un essai d'apprentissage et l'essai sonde du labyrinthe 4 sur 8



9.2 Questionnaire utilisé dans le labyrinthe 4 sur 8

RAPPORT VERBAL

Cette étape est TRÈS importante. Vous devez prendre en note **MOT POUR MOT** ce que le participant vous dit, et ne pas interpréter ce qu'il dit et l'écrire. Votre propre interprétation peut être incluse PAR LA SUITE, et cela pourrait également être fait par une autre personne pour évaluer la fiabilité inter-juges.

1. « *Comment avez-vous fait pour apprendre quelles allées emprunter et lesquelles éviter?* »

Laissez le participant répondre jusqu'à ce qu'il ait fini. Si le participant mentionne un ou des repères, allez plus loin : « *Lesquels?* » Si le participant ne mentionne qu'un seul repère: « *Est-ce le seul que vous avez utilisé?* »

« *Pouvez-vous me dire, étape par étape, qu'est-ce qui se passait dans votre tête alors que vous faisiez la tâche? Est-ce que vous pouvez me donner un exemple concret?* »

Si aucun repère n'est mentionné : « *Pouvez-vous être plus spécifique par rapport à la façon dont vous avez [numéroté] les allées? Où est-ce que votre [séquence] commençait?* »

« Pouvez-vous me dire, étape par étape, qu'est-ce qui se passait dans votre tête alors que vous faisiez la tâche? Est-ce que vous pouvez me donner un exemple concret? »

2. *« Avez-vous utilisé cette tactique durant tous les essais, du début à la fin? »*

Si le participant affirme qu'il a changé de méthode: *« Comment l'avez-vous changée? À quel moment? »*

3. *« Est-ce que votre position de départ était toujours la même, ou est-ce qu'elle changeait? En d'autres mots, quand on commençait le jeu, avant que vous bougiez, est-ce que vous faisiez toujours face à la même allée, ou est-ce que ça changeait? »*

4. Représentation: *« Maintenant j'aimerais que vous dessiniez une vue du haut de la plateforme et de ses allées, ainsi que de tous les [repères] dont vous vous rappelez, en prenant bien soin de les placer dans leur position relative appropriée.*